



Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Физический факультет, Кафедра физики ускорителей и радиационной медицины
НИИЯФ имени Д.В. Скобелевича, ОЯФММП



Золотов Сергей Александрович

Методы восстановления энергетического спектра пучка ускорителя электронов для повышения точности трехмерного дозиметрического планирования

Специальность 1.3.18

Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Доклад по материалам кандидатской диссертации

Научные руководители:

д.ф.-м.н., профессор Черняев А.П.

д.ф.-м.н. Близнюк У.А.

Москва, 2025

Актуальность технологии радиационной обработки

По данным ФАО ООН ежегодно в мире пропадает примерно треть всех произведенных продуктов питания (1,3 млрд. тонн)¹

Ежегодные пищевые отходы и потери в мире



30% зерновых
= 763 миллиардов упаковок пасты



45% фруктов и овощей
= 3.7 триллиона яблок



45% корнеплодов
= 1 миллиард мешков с картошкой



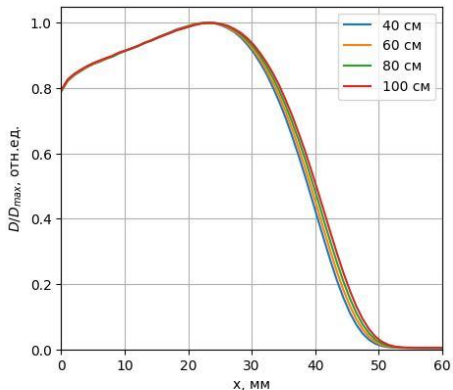
20% молочных продуктов
= 574 миллиардов яиц



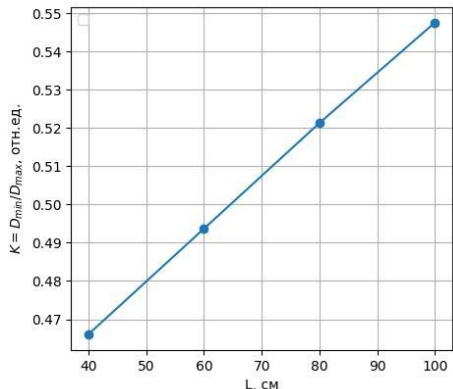
30% рыбы
= 3 миллиарда лососей



20% мяса
= 75 миллионов коров



Глубинные дозовые распределения в воде от электронов с начальной энергией 10 МэВ, прошедших в воздухе путь 40, 60, 80, 100 см

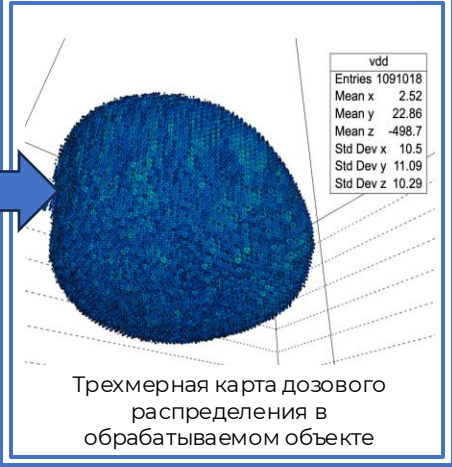
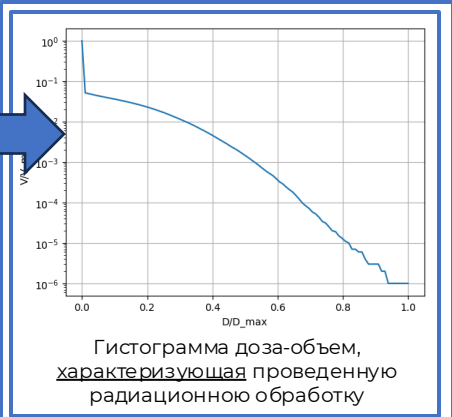
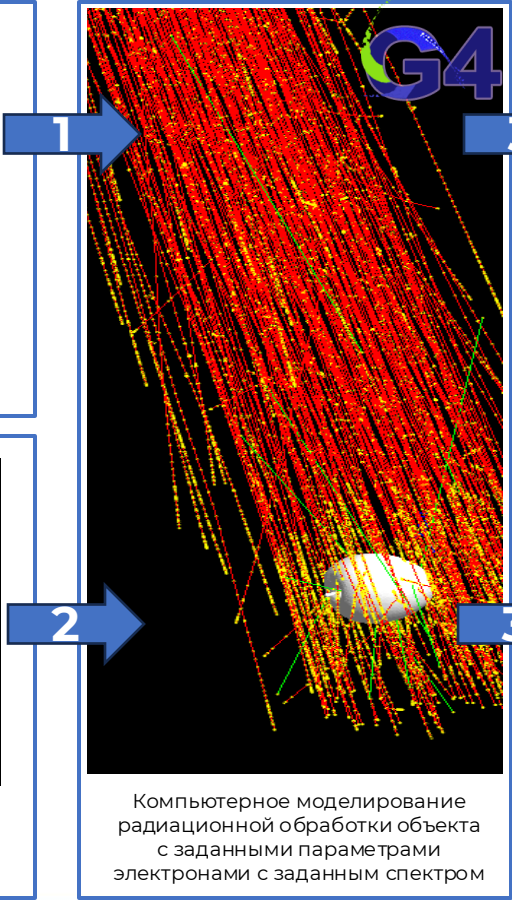


Зависимость отношения минимальной дозы к максимальной в объеме объекта, прошедшего радиационную обработку на расстоянии от 40 до 100 см от источника электронов с начальной энергией 10 МэВ.

¹ ФАО. 2019. Положение дел в области продовольствия и сельского хозяйства. Курс на сокращение потерь и порчи продовольствия. Рим <https://www.fao.org/3/ca6030ru/ca6030ru.pdf>



Процесс планирования Р/О

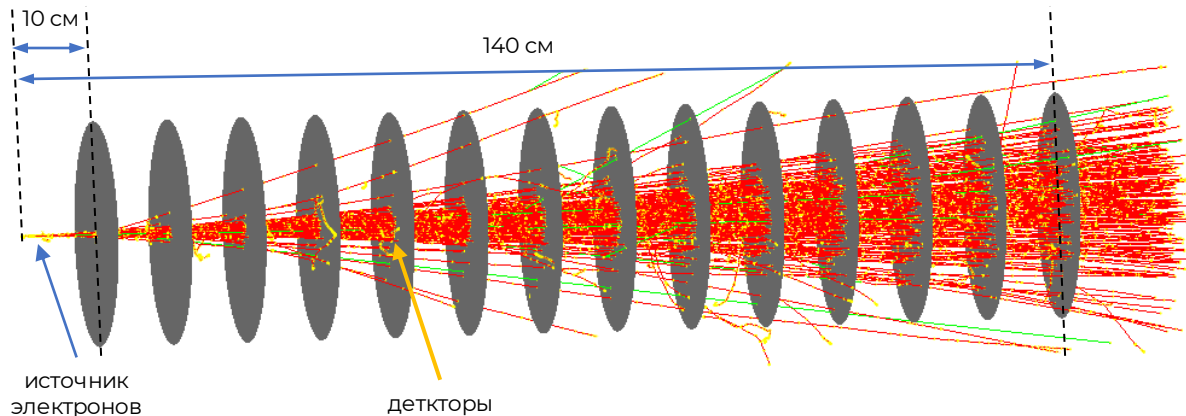


Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка методов восстановления энергетического спектра пучка ускоренных электронов на основе прямых и косвенных экспериментальных данных, для интеграции в системы дозиметрического планирования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

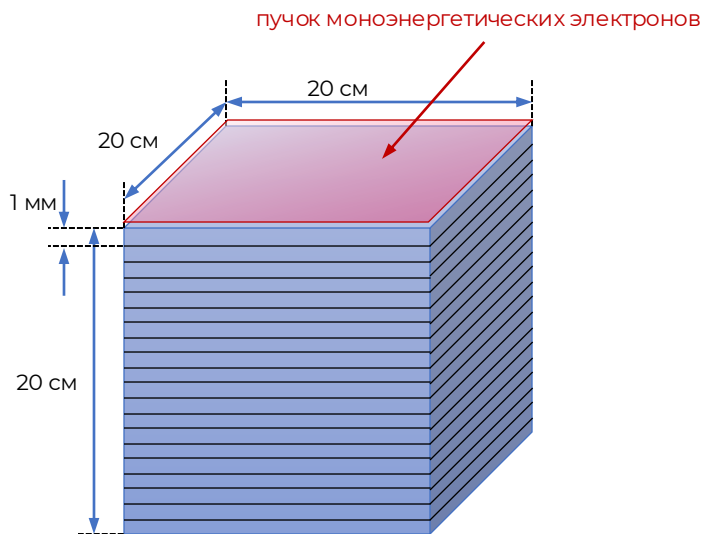
1. Установить с помощью компьютерного моделирования закон изменения энергетического спектра электронов при распространении в воздухе;
2. Решить обратную задачу восстановления спектра электронов у источника излучения по данным энергетического спектра на известном расстоянии от него;
3. Разработать на основе установленного закона метод регуляризации для решения обратной задачи восстановления спектра у поверхности фантома по глубинному дозовому распределению;
4. Провести экспериментальную проверку методов на ускорителях электронов.



Геометрия моделирования распространения тонкого пучка моноэнергетических электронов в воздухе. Красным отмечены треки электронов. Желтыми точками – взаимодействия электронов с воздухом. Зелеными линиями – треки фотонов.

Параметры моделирования

Количество первичных событий	10^7
Энергия первичных электронов	[0.1; 25] МэВ; шаг 0.1 МэВ
Расстояние до детекторов	[10; 140] см; шаг 10 см
PhysicsList	QBBC-Livermore
Cut	0.1 мм



Геометрия моделирования для расчета глубинных дозовых распределений в среде 20x20x20 см пучком моноэнергетических электронов

Параметры моделирования	
Размер фантома	20 x 20 x 20 см
Толщина одного слоя	1 мм
Количество первичных событий	10^7
Энергия первичных электронов	[0.1; 20] МэВ; шаг 0.1 МэВ
Материал фантома	Вода, «Твердая вода»*, PETG-пластик**, алюминий
PhysicsList	QBBC-Livermore
Cut	0.1 мм

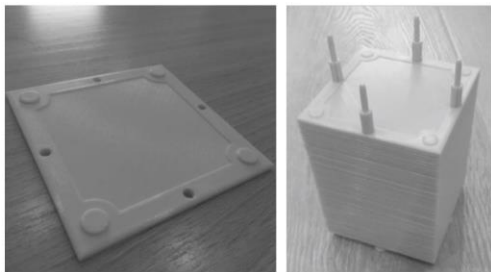
*«Твердая вода»:
97.9% Полистирол $(C_8H_8)_n$
2.1% Диоксид титана TiO_2
Плотность 1.045 г/см³

PETG: полиэтилентерефталат-гликоль $(C_{10}H_8O_4)_n$

Плотность 1.4 г/см³

Материалы и методы

Эксперименты на промышленных ускорителях электронов



Сборный фантом из 23 пластин из PETG-пластика толщиной 2.5 мм

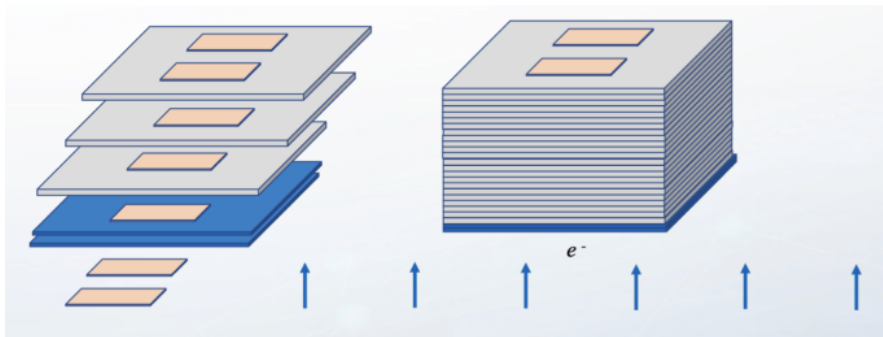


Схема облучения сборных фантомов на промышленных ускорителях электронов УЭЛР-10 и ИЛУ-14

- Ускоритель УЭЛР-10-15-С, энергия пучка 9.5 МэВ (центр Теклеор, г. Обнинск);
- Ускоритель ИЛУ-14, энергия пучка 10 МэВ (ФГБУ ГНЦ ФМБЦ имени А.И. Бурназяна, г. Москва);
- Сборный фантом из 23 пластин, изготовленных из PETG-пластика по технологии 3D-печати;
- Дозиметрические пленки государственного стандартного образца СО ПД(Э)-1/10 и СО ПД(Ф)Э-5/50. Погрешность определения поглощенной дозы 5%;
- Спектрофотометр ПЭ-5400ВИ

Материалы и методы

Эксперимент с использованием ускорителя электронов Varian TrueBeam

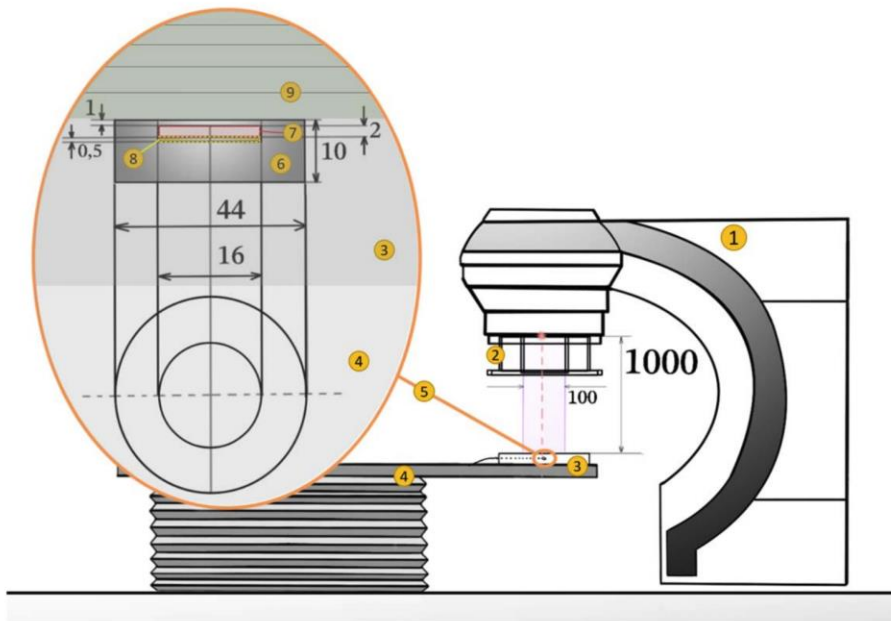
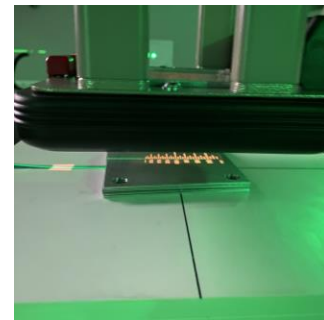
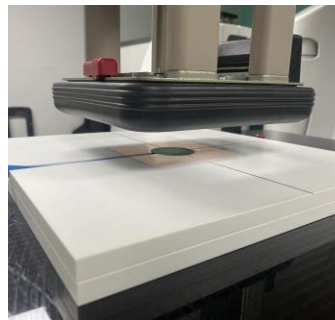


Схема измерения глубинных дозовых распределений на медицинском ускорителе электронов *Varian TrueBeam*. 1 – медицинский ускоритель электронов *Varian TrueBeam*; 2 – коллиматор; 3 – пластина «твердой воды» с пазом для ионизационной камеры; 4 – стол с регулируемой высотой; 5 – ионизационная камера; 6 – корпус ионизационной камеры; 7 – чувствительный объем ионизационной камеры; 8 – медный электрод; 9 – фантом (пластины из «твердой воды» или алюминия).

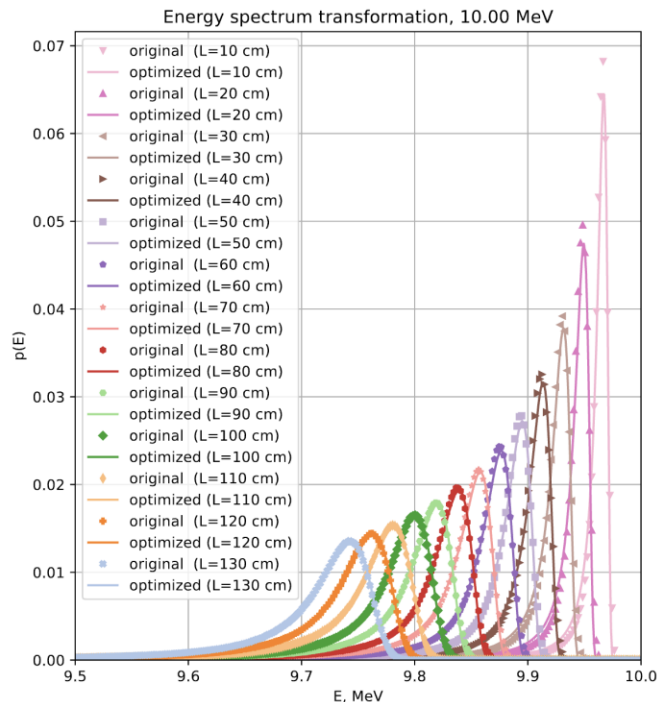
- Ускоритель электронов Varian TrueBeam, энергия пучка 6 МэВ, 9 МэВ (НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н.Н. Бурденко, г. Москва)
- Фантом из «твердой воды» PTW RW3 Slab Phantom
- Составной фантом из 40 алюминиевых пластин толщиной 0.93 мм
- Ионизационная камера Roos Chamber



Расположение фантомов из «твердой воды» и алюминия относительно выхода пучка

Результаты

Связь энергетического спектра пучка электронов с расстоянием



Энергетические спектры пучка электронов с начальной энергией 10 МэВ, прошедшего в воздухе путь от 10 см до 130 см с шагом 10 см

Полученные в компьютерном моделировании данные аппроксимировались с помощью модифицированного распределения Ландау:

$$\Lambda(E) = \lambda \left(\frac{E_0 - E - a}{b} \right)$$

$$\lambda(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \exp(-t \log(t) - xt) \sin(\pi t) dt$$

Здесь:

E_0 – начальная энергия электронов;

a – параметр сдвига;

b – параметр масштаба;

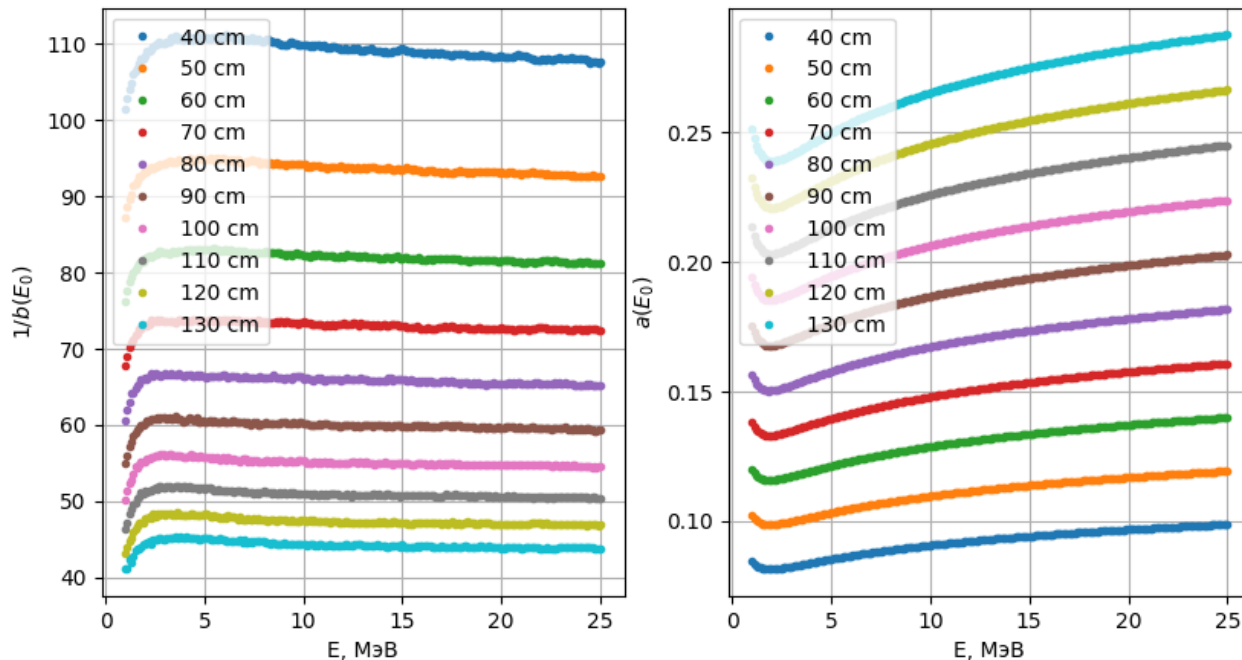
$\lambda(x)$ - классическое распределение Ландау.

Спектр пучка электронов $\Phi(E)$, прошедших в воздухе путь L , связан с начальным спектром электронов $\Phi_0(E)$ следующим соотношением:

$$\Phi(E, L) = \int_0^{E_{\max}} \Phi_0(\xi) \lambda\left(\frac{\xi - E - a(\xi, L)}{b(\xi, L)}\right) d\xi$$

Результаты

Зависимость параметров масштабирования и сдвига от начальной энергии электронов



Зависимость параметра сдвига $a(E_0)$ и обратного параметра масштабирования $\frac{1}{b(E_0)}$ в модифицированном распределении Ландау, описывающем энергетический спектр пучка электронов, прошедших в воздухе путь от 40 см до 130 см с шагом 10 см, от начальной энергии электронов.

Результаты

Аналитическое решение обратной задачи

- 1) Заметим, что $\frac{1}{b(\xi)} = b_0 (1 - f(\xi))$, при этом $f(\xi)$ - малая функция.
- 2) Разложим функцию λ в ряд Тейлора в окрестности аргумента $b_0(\xi - E)$, учитывая малость функций $a(\xi), f(\xi)$:

$$\lambda\left(\frac{\xi - E - a(\xi)}{b(\xi)}\right) \approx \lambda(b_0(\xi - E)) - b_0 \lambda'(b_0(\xi - E)) \cdot [(\xi - E)f(\xi) + a(\xi)]$$

- 3) С учетом полученного разложения функцию $\Phi(E)$ можно представить в виде:

$$\Phi(E) \approx \int \Phi_0(\xi) \lambda(b_0(\xi - E)) d\xi - b_0 \int_0^\infty \Phi_0(\xi) \lambda'(b_0(\xi - E)) \cdot [(\xi - E)f(\xi) + a(\xi)] d\xi$$

- 4) Представим $\begin{cases} \Phi_0 = \Phi_0^{(0)} + \delta\Phi_0; \Phi_0^{(0)} - \text{основной член, } \delta\Phi_0 - \text{малое возмущение} \\ \Phi = \Phi^{(0)} + \delta\Phi; \Phi^{(0)} - \text{основной член, } \delta\Phi - \text{малое возмущение} \end{cases}$

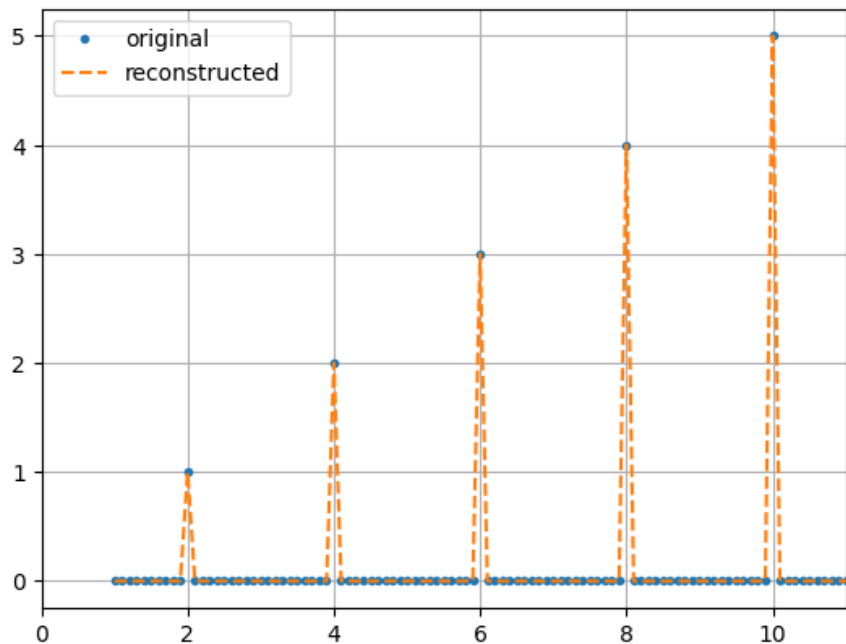
- 5) Находим решение обратной задачи в рамках теории возмущений:

$$\Phi_0(E) \approx \mathcal{F}^{-1} \left[\frac{\mathcal{F}[\Phi](\omega)}{\mathcal{F}[\lambda(b_0 x)](\omega)} \right] (E) - \mathcal{F}^{-1} \left[\frac{\mathcal{F} \left[b_0 \int_0^\infty \Phi_0^{(0)}(\xi) \lambda'(b_0(\xi - E)) \cdot [(\xi - E)f(\xi) + a(\xi)] d\xi \right] (\omega)}{\mathcal{F}[\lambda(b_0 x)](\omega)} \right] (E)$$

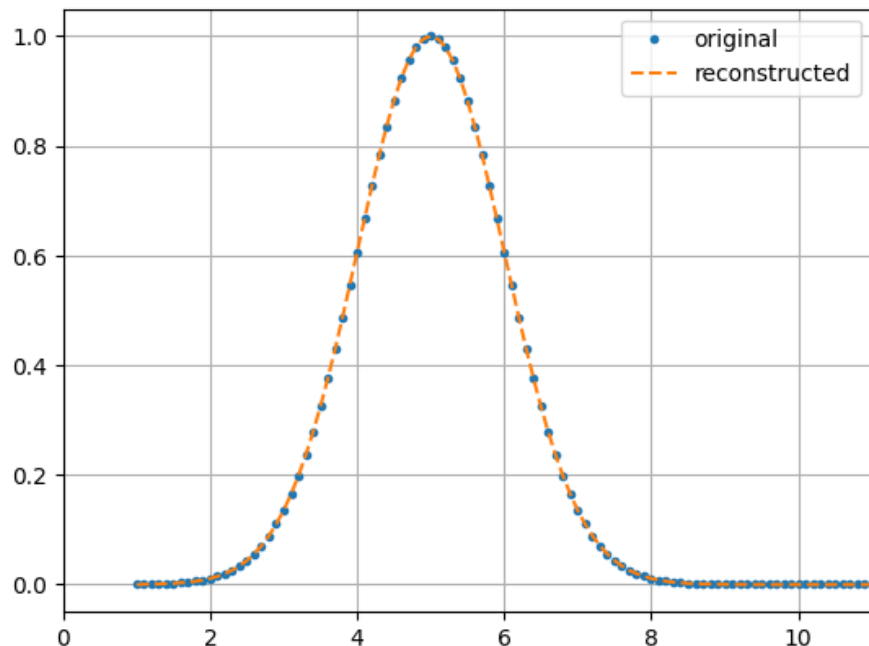


Результаты

Решение обратной задачи восстановления энергетического спектра пучка электронов



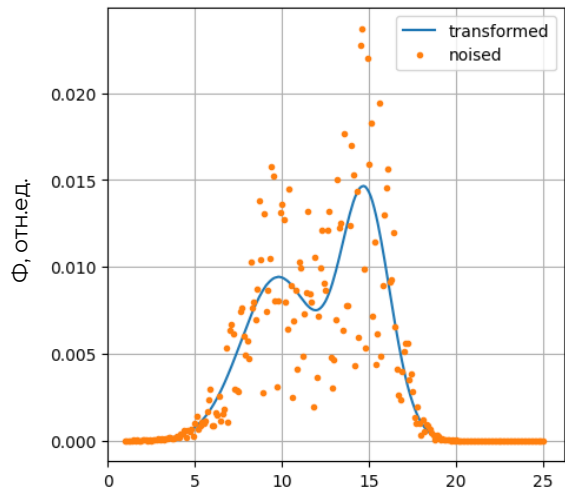
Начальный (синие точки) и восстановленный (оранжевые штрихи) дискретный энергетический спектр электронов



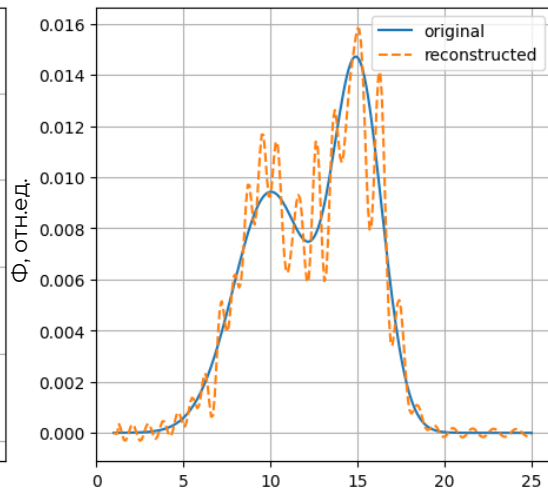
Начальный (синие точки) и восстановленный (оранжевые штрихи) энергетический спектр электронов, подчиняющийся распределению Гаусса

Результаты

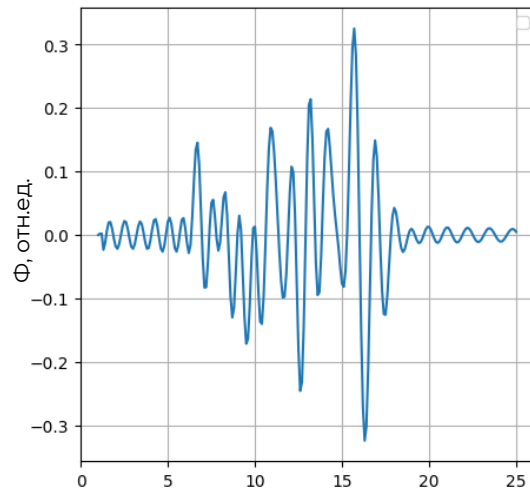
Решение обратной задачи восстановления энергетического спектра пучка электронов с погрешностью 75% во входных данных



а



б

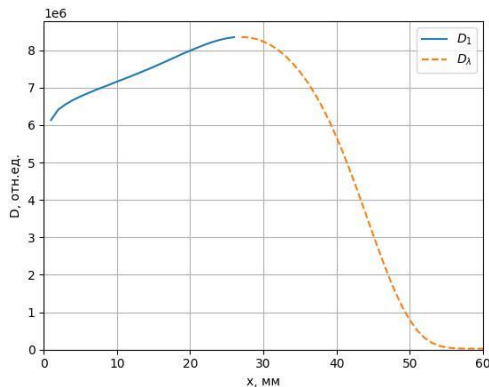


в

- (а) Энергетический спектр без погрешности (синяя кривая) и с искусственно внесенной 75%-погрешностью (оранжевые точки) для решения обратной;
(б) начальный (синяя кривая) и восстановленный (оранжевая прерывистая) энергетические спектры;
(в) разница между восстановленным и начальным спектрами

Результаты

Постановка задачи восстановления энергетического спектра пучка электронов у поверхности фантома по глубинному дозовому распределению с использованием распределения Ландау



Глубинное дозовое распределение (расчет инструментарий Geant4) от моноэнергетических электронов в воде, разбитое на $D_1(x)$ (синяя кривая) и $D_\lambda(x)$ (оранжевая штрихованная линия).

1) Представим $D(x) = D_1(x) + D_\lambda(x)$, $\Phi(E) = \Phi_1(E) + \Phi_\lambda(E)$

2) Будем искать $\Phi_\lambda(E)$ в виде свертки распределения Гаусса с модифицированным распределением Ландау:

$$\Phi_\lambda(E) = \int_0^{E_{max}} \exp\left(-\frac{(\xi-\mu)^2}{\sigma^2}\right) \lambda\left(\frac{\xi-E-a(\xi,L)}{b(\xi,L)}\right) d\xi,$$

минимизируя функционал

$$\left\| D_\lambda(x) - \int_0^{E_{max}} \Phi_\lambda(E) D_0(E, x) dE \right\|^2 \rightarrow \min$$

здесь $D_0(E, x)$ - дозовое ядро.

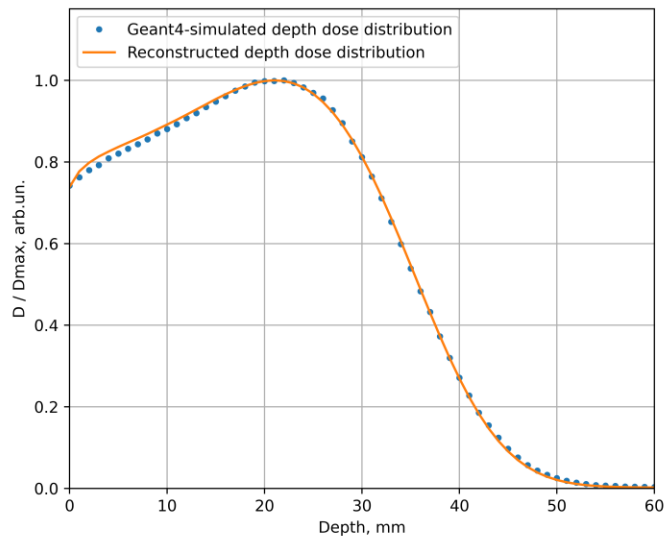
3) Используя регуляризацию Тихонова, найдем $\Phi_1(E)$ по рассчитанному $\Phi_\lambda(E)$ и учитывая

$$D(x) = D_1(x) + \int_0^{E_{max}} \Phi_\lambda(E) D_0(E, x) dE \Leftrightarrow D_1(x) = D(x) - \int_0^{E_{max}} \Phi_\lambda(E) D_0(E, x) dE$$

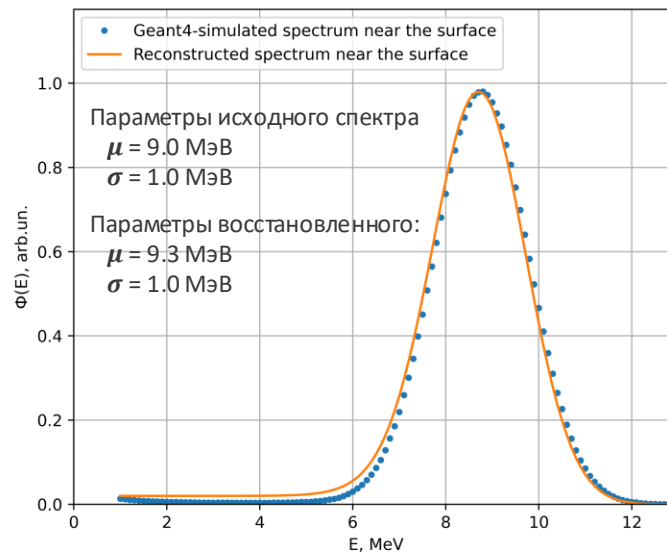
$$\| D_1(x) - \int_0^{E_{max}} \Phi_1(E) D_0(E, x) dE \|^2 + \lambda^2 \| \Phi_1(E) \|^2 \rightarrow \min$$

Результаты

Восстановление энергетического спектра электронов у поверхности фантома по глубинному дозовому распределению в воде, рассчитанному методом компьютерного моделирования



Глубинное дозовое распределение в воде (расчет инструментария Geant4), создаваемое электронами с энергетическим спектром, подчиняющимся распределению Гаусса с параметрами $\mu=9.0$ МэВ, $\sigma=1.0$ МэВ (синие точки) и аналитически рассчитанное глубинное дозовое распределение от восстановленного спектра (оранжевая кривая)

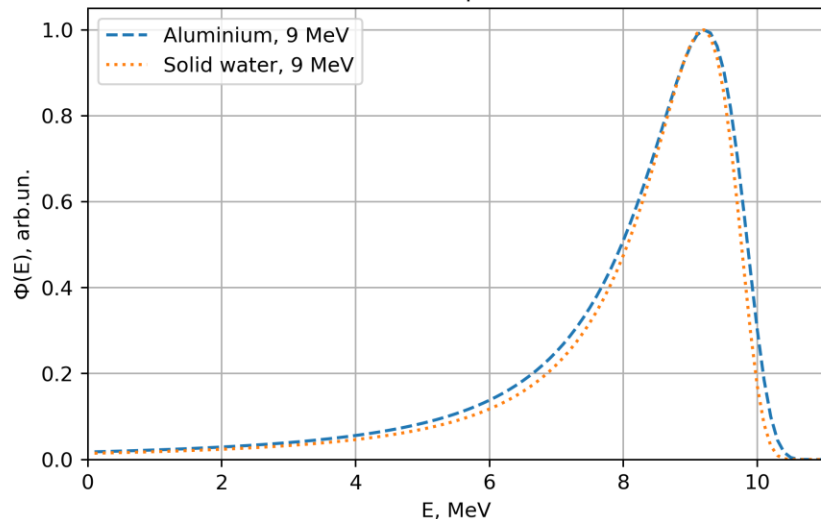


Энергетический спектр электронов, заданный в моделировании Geant4 (синие точки) и энергетический спектр электронов, восстановленный по глубинному дозовому распределению в воде (оранжевая кривая)

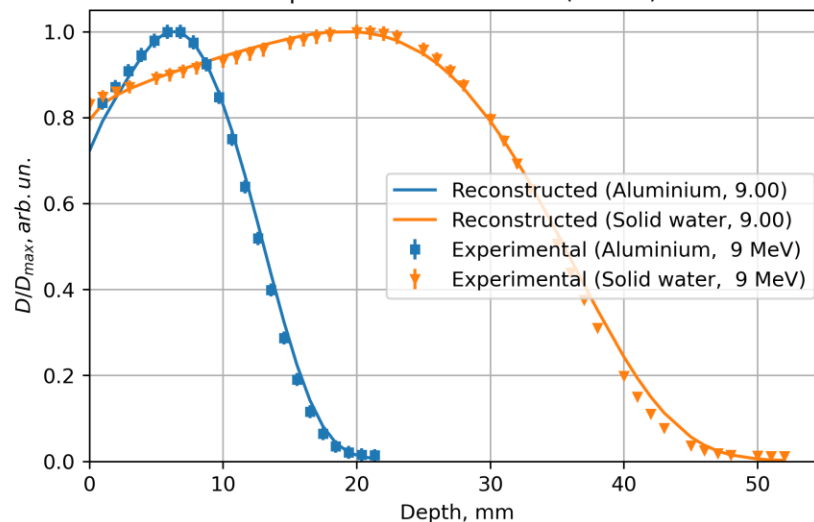
Результаты

Восстановление энергетического спектра ускорителя Varian TrueBeam, с эффективной энергией электронов 9 МэВ, по экспериментально измеренным глубинным дозовым распределениям в фантомах из «твердой воды» и алюминия

Reconstructed Spectra (9 MeV)



Depth-dose distributions (9 MeV)

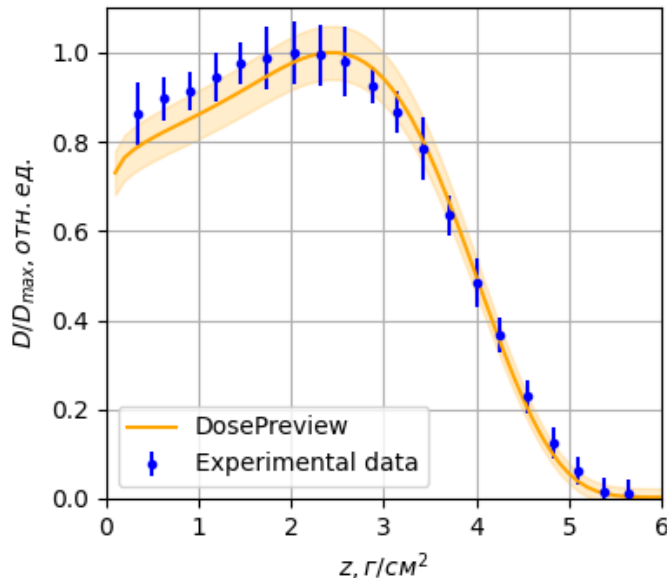


Энергетические спектры электронов, восстановленные по экспериментально измеренным глубинным дозовым распределениям в «твердой воде» (оранжевые точки) и алюминии (синие штрихи) для ускорителя Varian TrueBeam с эффективной энергией электронов 9 МэВ

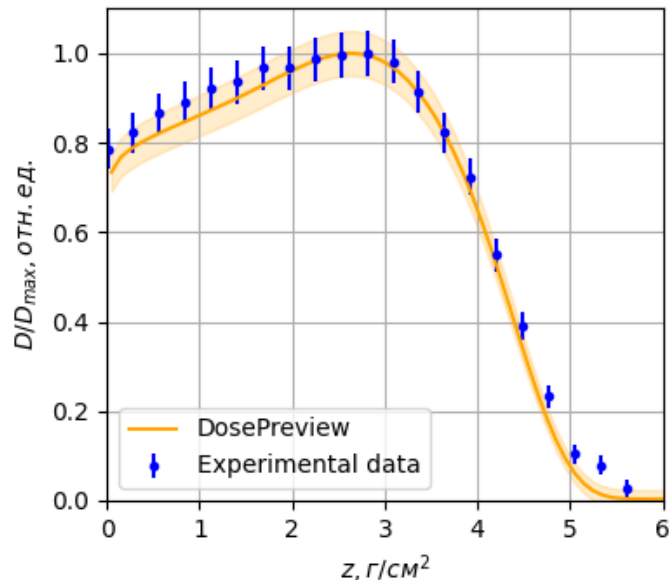
Экспериментально измеренные (символы) и аналитически рассчитанные (кривые) глубинные дозовые распределения в «твердой воде» (синий) и алюминии (оранжевый) для ускорителя Varian TrueBeam с эффективной энергией электронов 9 МэВ

Результаты

Сравнение глубинных дозовых распределений, рассчитанных по известному спектру, с экспериментальными данными



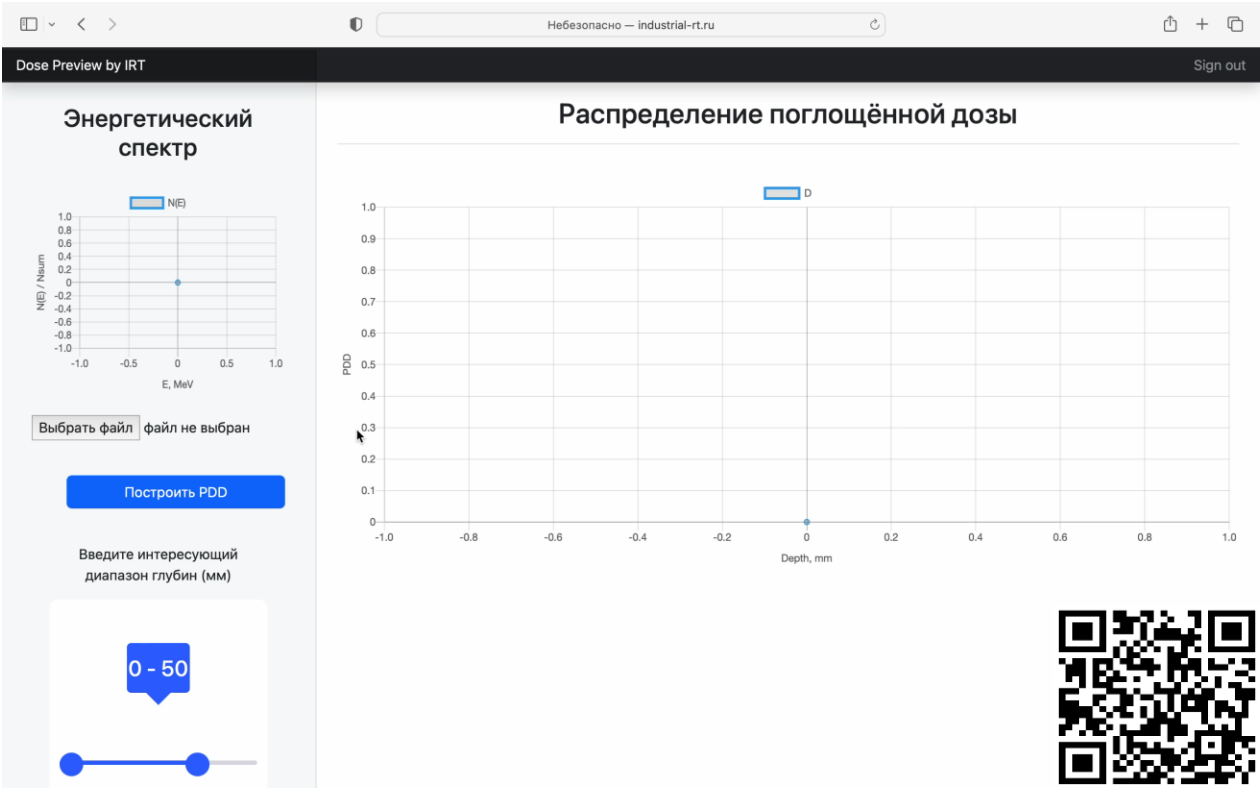
Экспериментально измеренные глубинные дозовые распределения в фантоме из PETG-пластика, измеренные на ускорителе УЭЛР-10-15-С-60 (синие точки) с эффективной энергией 9.5 МэВ и аналитически рассчитанные распределения по восстановленному спектру (оранжевая кривая).



Экспериментально измеренные глубинные дозовые распределения, измеренные на ускорителе ИЛУ-14 с эффективной энергией электронов 10 МэВ (синие точки) и аналитически рассчитанные распределения по восстановленному спектру (оранжевая кривая).

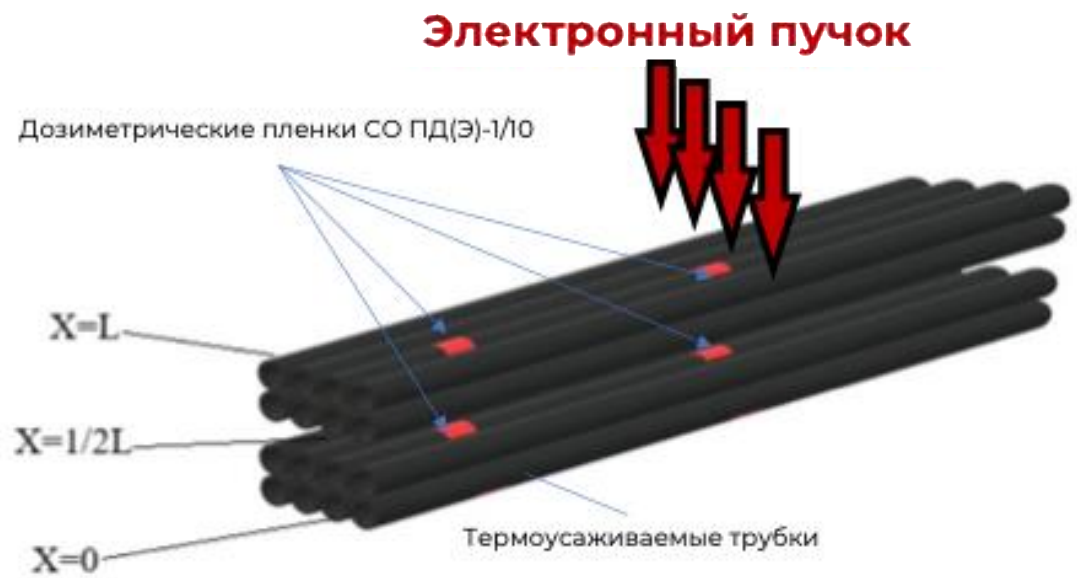
Результаты

Автоматизация расчета глубинных дозовых распределений по известному энергетическому спектру электронов



Материалы и методы

Эксперимент с обработкой термоусаживаемых изделий



- Ускоритель Mevex, энергия пучка 10 МэВ (Центр Axenter, г. Дубна)
- Радиохромные пленочные дозиметры GEX WinDose EA
- Спектрофотометр ПЭ -5400 УФ

Параметры трубок	
Внешний радиус, мм	35
Внутренний радиус, мм	31.5
Длина, мм	1340

Схема эксперимента по радиационной обработке термоусаживаемых трубок ТУТ 35Х3,5х1340 в бруске 4х4. Трубы каждой позиции были сформированы в бруски. Дозиметры Устанавливались в трех позициях:

- X=L, вход пучка излучения - поверхность верхнего ряда трубок, в двух местах (центр и край)
- X=1/2L, середина бруска, в двух местах (центр и край)
- X=0, выход пучка излучения, нижний ряд трубок, в двух местах (центр и край).

Результаты

Автоматизация расчета трехмерных дозовых распределений по объему полых цилиндрических фантомов при облучении электронами с известным энергетическим спектром

Rows Number

2

Columns Number

3

Inner Radius (mm)

5

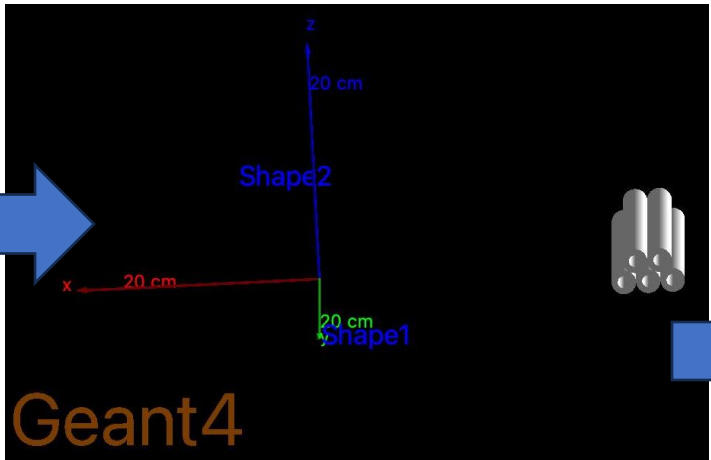
Outer Radius (mm)

10

Average Density (g/mm^3)

1

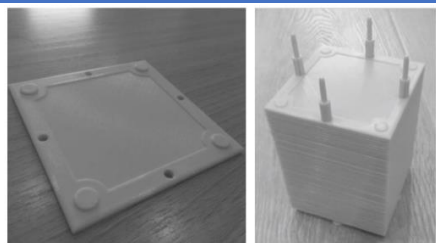
Apply Irradiation Scheme



Визуализация схемы облучения, созданной в Geant4-моделировании, автоматически созданной по параметрам, введенным пользователем в графический интерфейс системы планирования «Туя»

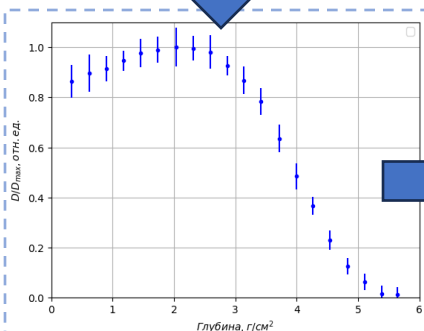
	Эксперимент	Моделирование
D_{min}/D_{max}	0.60 ± 0.15	0.70
D_{max}/D_{min}	1.7 ± 0.4	1.40

Процесс планирования Р/О



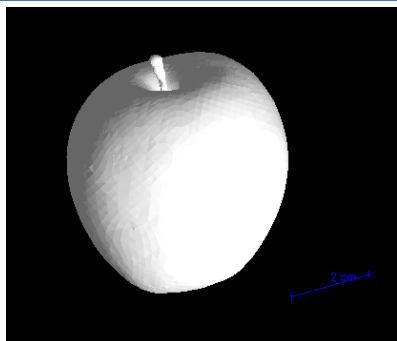
Измерение глубинного распределения поглощенной дозы в опорном веществе

1



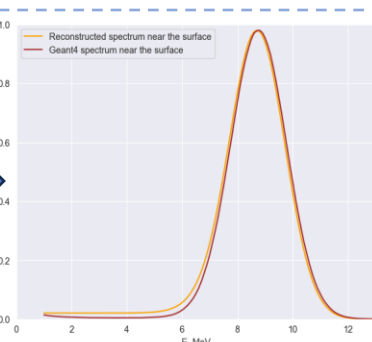
Глубинное дозовое распределение, экспериментально измеренное на ускорителе УЭЛР-10-15-С-60, работающего в режиме 10 МэВ

2



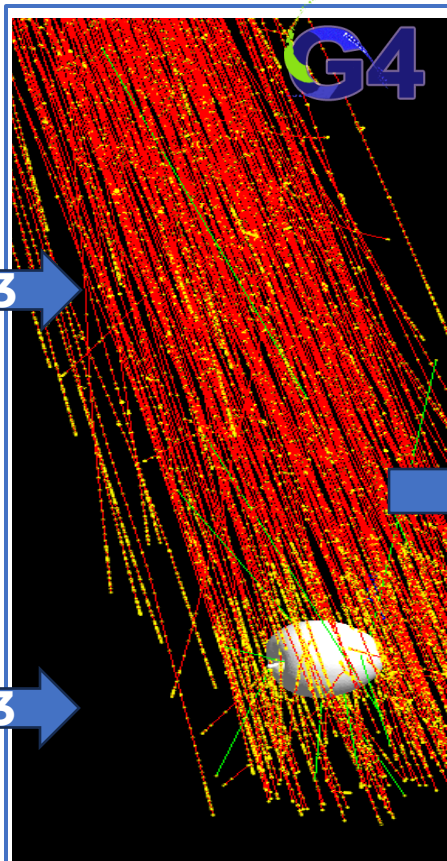
3D-модель объекта планирования

3

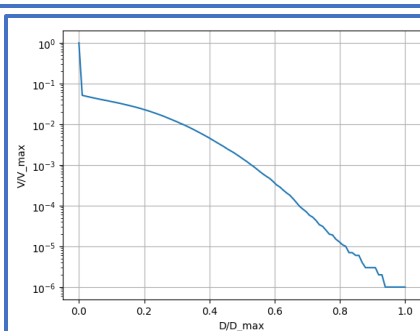


Восстановление энергетического спектра пучка по измеренному глубинному дозовому распределению

3

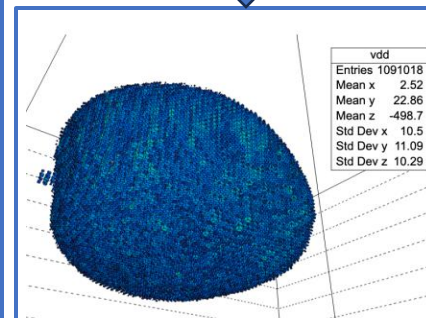


Компьютерное моделирование радиационной обработки объекта с заданными параметрами электронами с заданным спектром



Гистограмма доза-объем, характеризующая проведенную радиационную обработку

4



Трехмерная карта дозового распределения в обрабатываемом объекте

Результаты

Автоматизация расчета трехмерных дозовых распределений по объему полых цилиндрических фантомов при облучении электронами с известным энергетическим спектром



Demetra by Industrial Radiation Technologies

Length (cm)		Irradiation sides	
Width (cm)		Sweep (cm)	
Mass (kg)		Beam Energy (MeV)	
Dose (Gy)		Beam Current (mA)	
PROVIDE IRRADIATION SCHEME		Pulse Duration (us)	
		Pulse Frequency (Hz)	
		Sweep Frequency (Hz)	
		Conveyor Speed (cm/s)	
		D_min / D_max	
		D_max / D_min	

Dose top (Gy)		0 mm	...	...
Dose mid (Gy)		9 mm	...	...
Dose bot (Gy)		Expected Uniformity	...	
CALIBRATE IRRADIATION SCHEME		CALIBRATE IRRADIATION SCHEME		

Выводы

1. Разработан метод восстановления энергетического спектра электронного пучка, основанный на распределении Ландау, позволяющий восстановить энергетический спектр пучка электронов с максимальной энергией до 25 МэВ.
2. Предложенный метод, базирующийся на модели представления спектра электронного пучка посредством свёртки исходного спектрального распределения, формируемого на выходе ускорительного комплекса, с функцией Ландау, обеспечивает восстановление энергетического спектра электронов с максимальной энергией до 25 МэВ в любой пространственной точке с абсолютной точностью, используя данные спектра в известной фиксированной позиции.
3. Разработан алгоритм восстановления энергетического спектра электронов с максимальной энергией до 25 МэВ, по экспериментально измеренным глубинным дозовым распределениям в эталонных средах (однородные параллелепипеды из воды, алюминия) с учетом распределения Ландау и использованием регуляризации Тихонова.
4. Предлагаемый алгоритм демонстрирует точность определения искомого спектра электронов до 5%. Разработанный алгоритм позволяет проводить точное воспроизведение дозовых профилей в исследуемой среде с сопоставимой степенью точности (5%).
5. Введение при использовании разработанного метода восстановления энергетического спектра по глубинным дозовым распределениям систематической погрешности в значения регистрируемых доз до уровня 25% ведет к искажению восстановленных спектральных характеристик пучка электронов не более чем на 10%.
6. Основываясь на предложенных алгоритмах, разработаны автоматизированные системы расчета трехмерных дозовых распределений, позволяющие рассчитать с 5%-точностью трехмерное дозовое распределение по объему объекта произвольной формы и состава.

Положения, выносимые на защиту

1. Предложенный метод, базирующийся на модели представления спектра электронного пучка посредством свёртки исходного спектрального распределения, формируемого на выходе ускорительного комплекса, с функцией Ландау, обеспечивает восстановление энергетического спектра электронов с максимальной энергией до 25 МэВ в любой пространственной точке с абсолютной точностью, используя данные спектра в известной фиксированной позиции.
2. Предлагаемый алгоритм реконструкции энергетического спектра электронов с максимальной энергией до 25 МэВ, по экспериментально измеренным глубинным дозовым распределениям в эталонных средах (однородные параллелепипеды из воды, алюминия) с учетом распределения Ландау и использованием регуляризации Тихонова демонстрирует точность определения искомого спектра электронов до 5%. Разработанный алгоритм позволяет проводить точное воспроизведение дозовых профилей в исследуемой среде с сопоставимой степенью точности (5%). Введение систематической погрешности в значения регистрируемых доз до уровня 25% ведет к искажению восстановленных спектральных характеристик пучка электронов не более чем на 10%.
3. Автоматизированные системы расчета трехмерных дозовых распределений, основанные на разработанных алгоритмах, обеспечивают 5%-точность дозиметрического планирования радиационной обработки пучками электронов электронов с известным энергетическим спектром объектов произвольной формы и состава.

Публикации

Соискатель является соавтором 26 печатных работ. Основные результаты по теме диссертации изложены в 19 статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, а также в 2 свидетельствах о регистрации прав на ПО:

1. Landau distribution-based regularized algorithm for reconstruction of electron beam energy spectrum using depth dose distributions in targeted materials / S. Zolotov, U. Bliznyuk, A. Nikitchenko et al. // Physica Scripta. — 2025. — Q1.
2. DosePreview software for rapid planning of radiation processing of biological objects and materials / S.A. Zolotov, U.A. Bliznyuk, N.A. Antipina et al. // Physics of Atomic Nuclei. — 2024. — Vol. 87, № 2. — P. 42-50. — Q3.
3. Optimization function for determining optimal dose range for beef and seed potato irradiation / E. Kozlova, U. Bliznyuk, A. Chernyaev et al. // FOODS. — 2024. — Vol. 13, № 23. — P. 3729. — Q1.
4. Combination of aluminum plates of different thicknesses to increase the homogeneity of radiation treatment by accelerated electrons / S.A. Zolotov, U.A. Bliznyuk, F.R. Studenikin et al. // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2023. — Vol. 20. — P. 954-958. — Q4.
5. Electron beam irradiation to control Rhizoctonia solani in potato / N. Chulikova, A. Malyuga, P. Borshchegovskaya et al. // AGRICULTURE-BASEL. — 2023. — Vol. 13, № 6. — P. 1221. — Q1.
6. Electron beam modification for improving dose uniformity in irradiated objects / F.R. Studenikin, U.A. Bliznyuk, A.P. Chernyaev et al. // European Physical Journal: Special Topics. — 2023. — Q2.
7. Estimation of doses absorbed by potato tubers under electron beam or X-ray irradiation using an optical fingerprinting strategy / A.V. Shik, E.V. Skorobogatov, U.A. Bliznyuk et al. // Food Chemistry. — 2023. — Vol. 414. — P. 135668. — Q1.
8. Radiation processing of seed potatoes as a method for suppressing various forms of rhizoctonia in new crop tubers / N.S. Chulikova, A.A. Malyuga, U.A. Bliznyuk et al. // Russian agricultural sciences. — 2023. — Vol. 49, № 1. — P. S113-S121. — Q4.
9. Reconstruction of depth dose distributions in materials created by electron beam / U.A. Bliznyuk, P.Yu. Borshchegovskaya, S.A. Zolotov et al. // Physics of Particles and Nuclei. — 2023. — Vol. 54, № 4. — P. 575-580. — Q3.

10. Восстановление глубинных распределений поглощенной дозы при прохождении пучков электронов через вещество / У.А. Близнюк, П.Ю. Борщеговская, С.А. Золотов и др. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2023. — Т. 54, № 4. — С. 728-737. — Q4.
11. Комбинация алюминиевых пластин различной толщины для повышения однородности радиационной обработки ускоренными электронами / С.А. Золотов, У.А. Близнюк, Ф.Р. Студеникин и др. // Письма в журнал "Физика элементарных частиц и атомного ядра". — 2023. — Т. 20, № 4(249). — С. 1069-1075. — Q4.
12. Радиационная обработка семенного картофеля как метод подавления различных форм ризоктониоза на клубнях нового урожая / Н.С. Чуликова, А.А. Малюга, У.А. Близнюк и др. // Агрохимия. — 2023. — № 2. — С. 69-78. — Q4.
13. Controlling the distribution of doses in photon beam radiotherapy / A.G. Sinelnikov, A.P. Chernyaev, A.A. Shcherbakov et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2022. — Vol. 86, № 8. — P. 927-930. — Q4.
14. Determining the electron beam spectrum after passing through aluminum plates / U.A. Bliznyuk, P.Yu. Borshchegovskaya, S.A. Zolotov et al. // Moscow University Physics Bulletin. — 2022. — Vol. 77, № 4. — P. 615-621. — Q4.
15. Impact of 1-MeV electron beam irradiation on the phenology and microflora of potatoes / N.S. Chulikova, A.A. Malyuga, U.A. Bliznyuk et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2022. — Vol. 86, № 12. — P. 1549-1556. — Q4.
16. Влияние пучка ускоренных электронов с энергией 1 МэВ на рост и микрофлору картофеля / Н.С. Чуликова, А.А. Малюга, У.А. Близнюк и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2022. — Т. 86, № 12. — С. 1817-1825. — Q4.
17. Разработка метода контроля распределения дозы в лучевой терапии на пучках фотонов / А.Г. Синельников, А.П. Черняев, А.А. Щербаков и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2022. — Т. 86, № 8. — С. 1123-1126. — Q4.
18. Расчет спектра пучка электронов после прохождения алюминиевых пластин / У.А. Близнюк, П.Ю. Борщеговская, С.А. Золотов и др. // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. — 2022. — № 4. — С. 1-6. — Q4.
19. Применение низкоэнергетического электронного излучения для обработки охлажденного мяса индейки. Оптимизация параметров воздействия / А.П. Черняев, В.М. Авдюхина, У.А. Близнюк и др. // Научные технологии. — 2020. — Т. 21, № 1. — С. 40-49. — Q4.
20. DEMETRA : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023669934 / А.П. Черняев, В.В. Ханкин, У.А. Близнюк, С.А. Золотов, Ф.Р. Студеникин; правообладатель - ООО "Промышленные радиационные технологии". — 22.09.2023.
21. Dose Preview : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023669628 / А.П. Черняев, В.В. Ханкин, У.А. Близнюк, С.А. Золотов, Ф.Р. Студеникин; правообладатель - ООО "Промышленные радиационные технологии". — 18.09.2023.

Доклады на конференциях:

1. 3D-дозиметрическое планирование радиационной обработки биологических объектов и материалов // Международная научно-практическая конференция ПОЛЯРНОЕ СИЯНИЕ 2025, Санкт-Петербург, Россия, 16-20 июня 2025
2. Комплексный подход к планированию радиационной обработки биообъектов и материалов // I Международный молодежный научный форум "РадМед – 2024", МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 10-11 декабря 2024
3. Восстановление энергетического спектра пучка электронов по глубинному дозовому распределению с использованием распределения Ландау // Семинар памяти профессора Б.С. Ишханова, НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 24 октября 2024
4. Быстрое планирование радиационной обработки пищевой и сельскохозяйственной продукции // III Международная молодежная конференция «Генетические и радиационные технологии в сельском хозяйстве», Обнинск, НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ, Россия, 23-24 октября 2024
5. DOSIMETRIC PLANNING OF RADIATION TREATMENT OF BIO-OBJECTS AND MATERIALS // LXXIV International conference Nucleus-2024: Fundamental problems and applications, Дубна, ОИЯИ, Россия, 1-5 июля 2024
6. Algorithm for reconstruction of electron accelerator beam energy spectrum for high-precision dosimetric planning of radiation treatment // RAP-2024, Granada, Испания, 10-12 июня 2024
7. Reconstruction of Electron Beam Energy Spectrum to Increase the Precision of Irradiation Dose Uniformity Estimate // IAEA International Symposium on Food Safety and Control, г. Вена, Австрия, 27-31 мая 2024
8. Восстановление энергетического спектра ускорителя электронов по экспериментально измеренным распределениям поглощенной дозы в опорном материале // 73-я международная конференция по ядерной физике «ЯДРО-2023: Фундаментальные вопросы и приложения», Саров, Россия, 9-13 октября 2023
9. ПРИМЕНЕНИЕ ПУЧКОВ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ // Биотехнология - наука и практика 2023, п. Новомихайловский (Краснодарский край, Туапсинский район), Отель «Family club Primorskaya», Россия, 11-14 сентября 2023
10. Восстановление спектра пучка электронов по экспериментально измеренным глубинным распределениям поглощённой дозы // XXX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2023». Секция «Физика», Москва, Россия, 10-21 апреля 2023
11. РАСЧЁТ КОМБИНАЦИИ АЛЮМИНИЕВЫХ ПЛАСТИН ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ОДНОРОДНОСТИ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ // I Международная молодежная конференция «Генетические и радиационные технологии в сельском хозяйстве», Москва, Россия, 18-21 октября 2022
12. INCREASING UNIFORMITY OF DOSE DISTRIBUTION THROUOUT SPHERICAL OBJECTS DURING RADIATION TREATMENT // RAD 2022, Herceg Novi, Черногория, 13-17 июня 2022
13. Method for increasing the dose distribution uniformity during electron radiation treatment // RAP 2022, KEDEA Center, Thessalonik, Греция, 6-10 июня 2022
14. ПОВЫШЕНИЕ ОДНОРОДНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГЛОЩЁННОЙ ДОЗЫ ПО ОБЪЁМУ ОБЪЕКТОВ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ПРИ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ ЭЛЕКТРОНАМИ // XXII межвузовская молодежная научная школа-конференция имени Б. С. Ишханова "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине", МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 22-23 ноября 2021
15. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ОБЪЕКТА НА РАВНОМЕРНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГЛОЩЁННОЙ ДОЗЫ // LXXI Международная конференция «ЯДРО - 2021. Ядерная физика и физика элементарных частиц. Технологии ядерной физики», Санкт-Петербург, Россия, 20-25 сентября 2021



Грантовая поддержка исследований

Проведенные исследования выполнялись при финансовой поддержке следующих научных фондов:

1. **Российский научный фонд** (грант № 22-63-00075) по проекту "Поиск биохимических маркеров идентификации радиационной обработки объектов органического происхождения» (участник)
2. **Фонд содействия инновациям** (программа "Старт-1"), что позволило реализовать прикладные аспекты разработки.

The background of the slide is a dark blue gradient. On the right side, there is a complex, glowing blue molecular or network structure. It consists of numerous small dots (nodes) connected by thin, light blue lines (edges), forming a dense, interconnected web that resembles a crystal lattice or a complex molecule. The structure is more concentrated on the right and fades out towards the left.

Золотов Сергей Александрович
E-mail: zolotov.sa15@physics.msu.ru
Telegram: [@ignobillium](#)

26.06.2025

Соответствие паспорту специальности

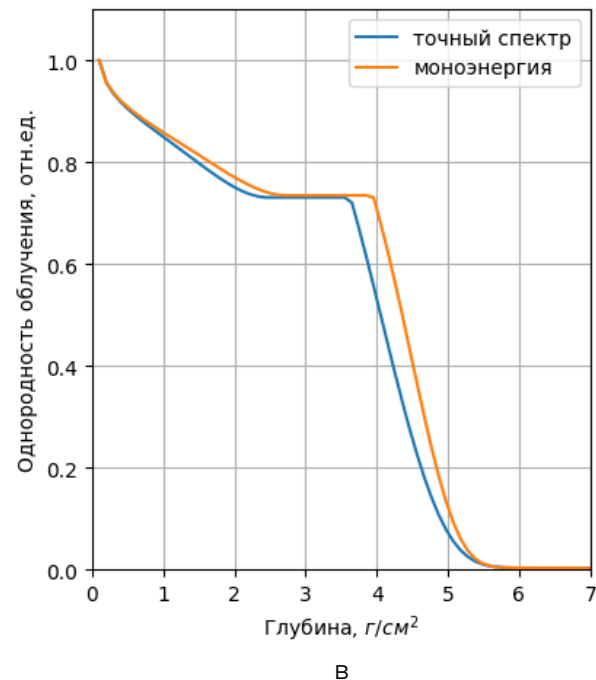
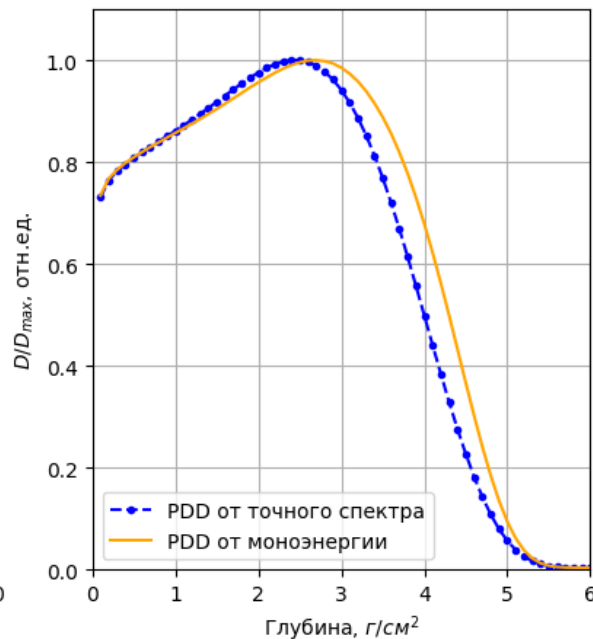
Исследование соответствует следующим пунктам паспорта специальности 1.3.18:

1. Получение пучков заряженных частиц, расчетно-теоретические и экспериментальные исследования параметров пучков.

7. Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования взаимодействий пучков заряженных частиц с электромагнитными полями, друг с другом, с молекулами остаточного газа и мишенями.

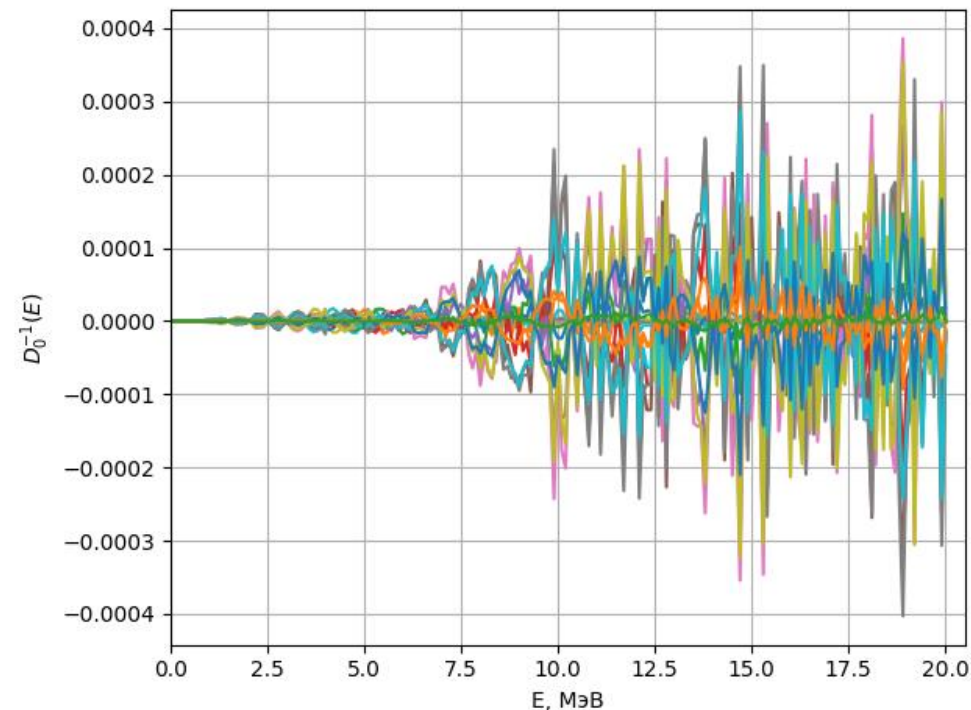
Приложения ко главе 0

Влияние энергетического спектра электронов на глубинное распределение поглощенной дозы



(а) сравнение характерного энергетического спектра ускорителя электронов и моноэнергетического спектра; (б) сравнение глубинных дозовых распределений от экспериментально измеренного и моноэнергетического спектров; (в) зависимость однородности обработки от размера облучаемого объекта для экспериментально измеренного и моноэнергетического спектров

Восстановление энергетического спектра электронов по дозе



Визуализация псевдообратной матрицы D_0^{-1}

Связь энергетического спектра электронов с глубинным дозовым распределением:

$$D(x) = \int_0^{\infty} D_0(x, E) \Phi(E) dE$$

$D(x)$ - измеренное дозовое распределение

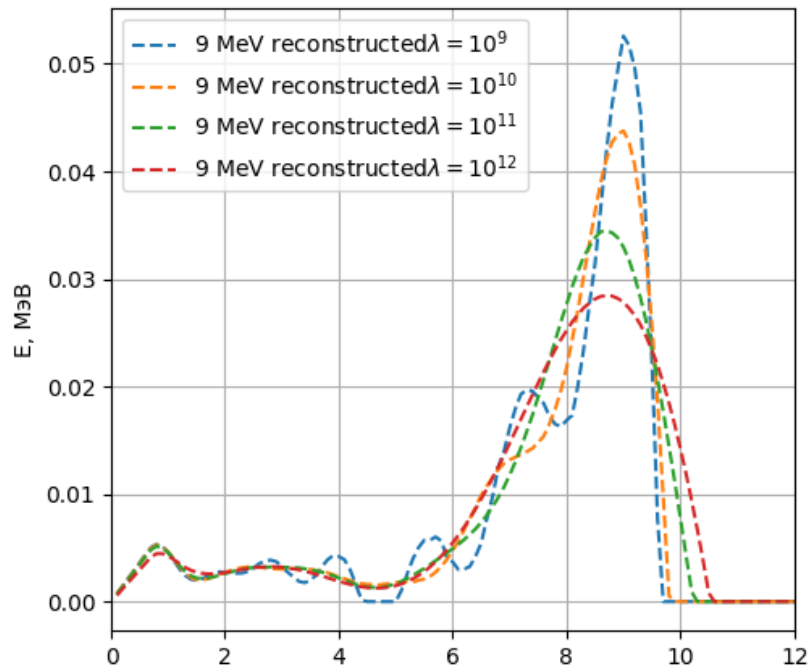
$D_0(x, E)$ - дозовое ядро

$\Phi(E)$ - энергетический спектр электронов

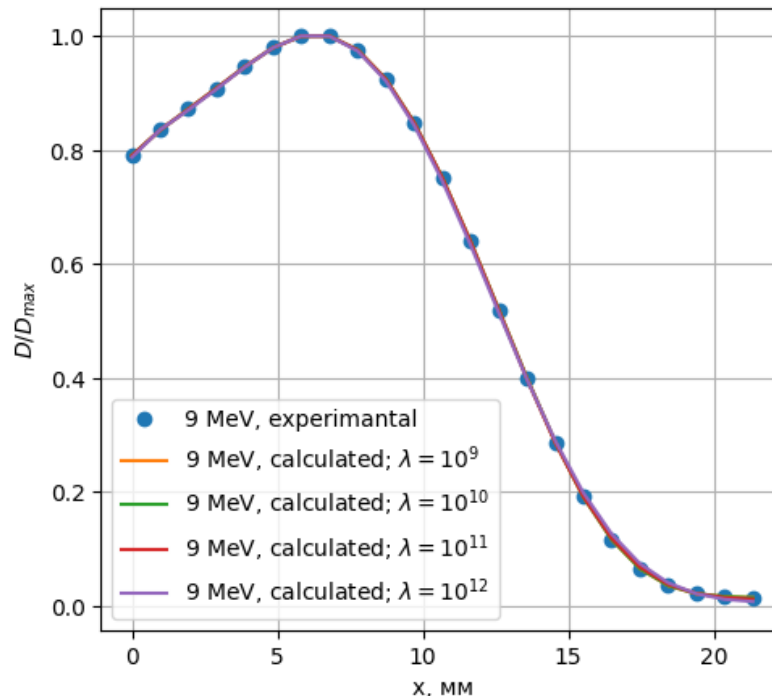
То же соотношение в матричной форме:

$$D = D_0 \Phi$$

Особенности решений, полученных с помощью регуляризации Тихонова



Энергетические спектры, восстановленные по глубинному дозовому распределению методом регуляризации Тихонова

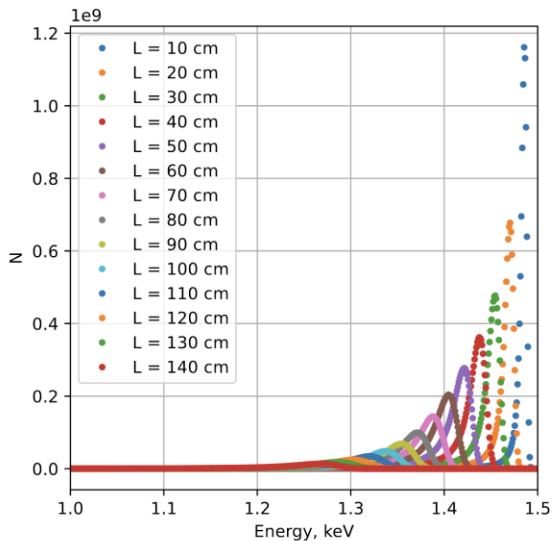


Экспериментально измеренное глубинное дозовое распределение (синие точки) и распределения, соответствующие восстановленным спектрам (непрерывные кривые)

Приложения ко главе 1

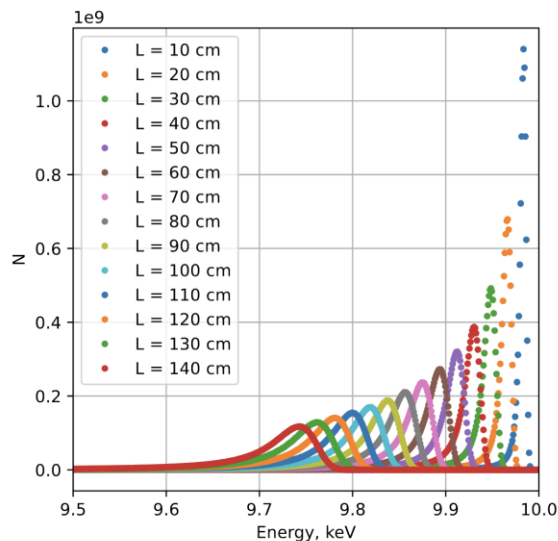
Результаты моделирования распространения электронного пучка в воздухе

$E_0 = 1500 \text{ keV}$



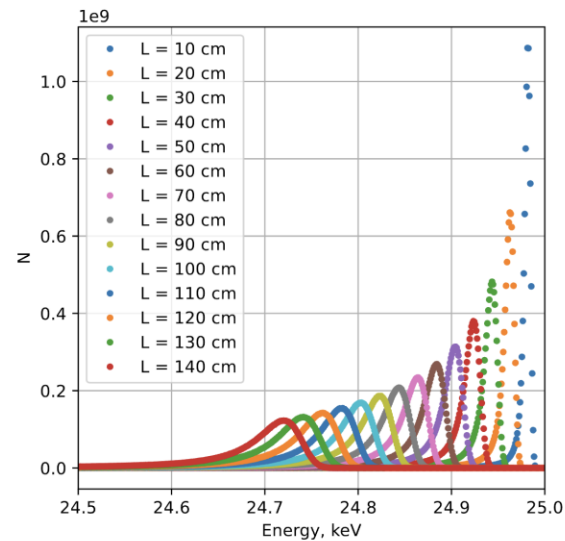
Энергетические спектры электронов с начальной энергией **1.5 МэВ**, прошедших в воздухе путь до 130 см.

$E_0 = 10000 \text{ keV}$



Энергетические спектры электронов с начальной энергией **10 МэВ**, прошедших в воздухе путь до 130 см.

$E_0 = 25000 \text{ keV}$



Энергетические спектры электронов с начальной энергией **25 МэВ**, прошедших в воздухе путь до 130 см.

Аппроксимация данных моделирования с помощью распределения Ландау

E_0 – начальная энергия электронов

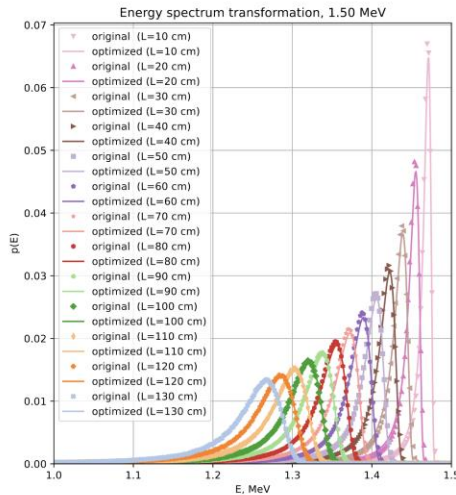
a – параметр сдвига

b – параметр масштаба

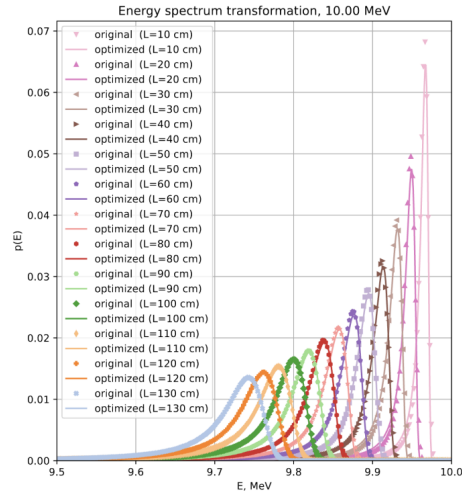
$\lambda(x)$ - классическое распределение Ландау

$$\Lambda(E) = \lambda \left(\frac{E_0 - E - a}{b} \right)$$

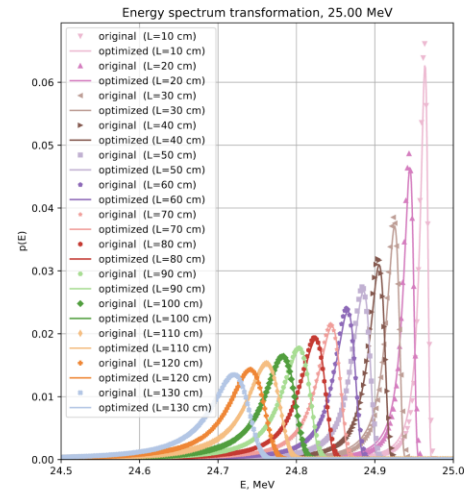
$$\lambda(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \exp(-t \log(t) - xt) \sin(\pi t) dt$$



Энергетические спектры электронов
с начальной энергией **1.5 МэВ**,
прошедших в воздухе путь до **130 см**



Энергетические спектры электронов
с начальной энергией **10 МэВ**,
прошедших в воздухе путь до **130 см**



Энергетические спектры электронов
с начальной энергией **25 МэВ**,
прошедших в воздухе путь до **130 см**

Метрики качества аппроксимации

1.5 МэВ

L	Среднекв.	Пирсон
10	0,01	0,996
20	0,01	0,997
30	0,01	0,998
40	0,01	0,998
50	0,01	0,998
60	0,01	0,998
70	0,01	0,999
80	0,01	0,999
90	0,01	0,999
100	0,01	0,999
110	0,01	0,999
120	0,01	0,999
130	0,01	0,999

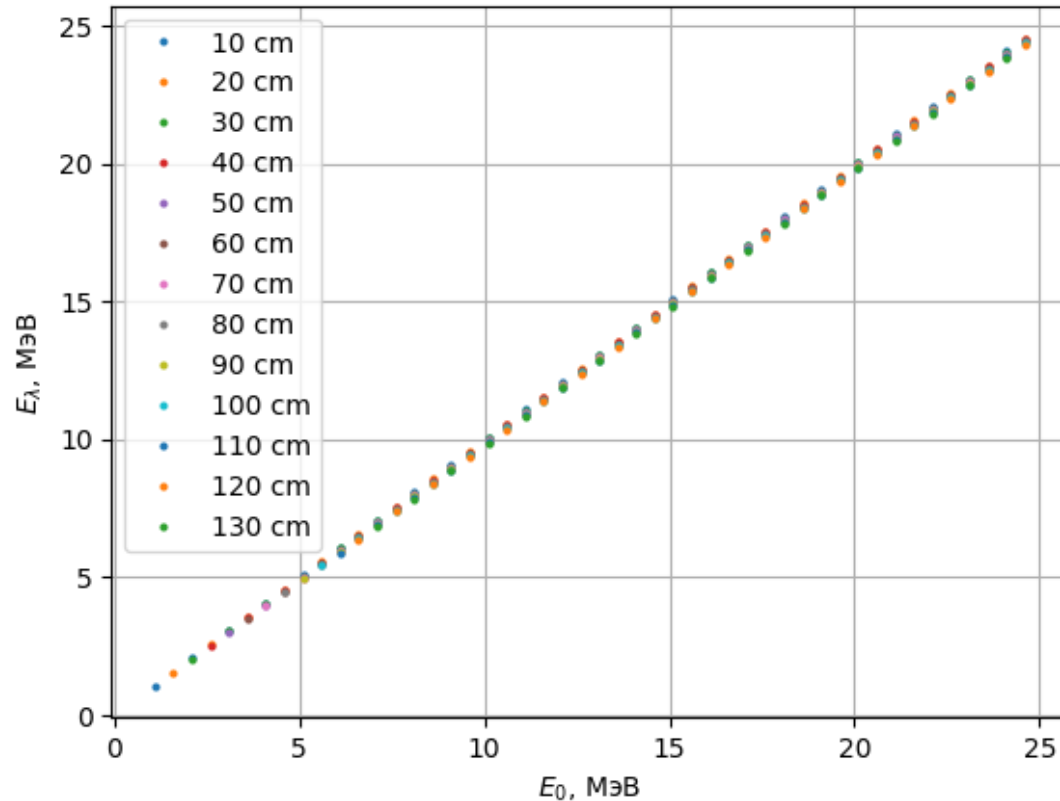
10 МэВ

L	Среднекв.	Пирсон
10	0,01	0,994
20	0,01	0,996
30	0,01	0,997
40	0,01	0,997
50	0,01	0,998
60	0,01	0,998
70	0,01	0,999
80	0,01	0,999
90	0,01	0,999
100	0,01	0,999
110	0,01	0,999
120	0,01	0,999
130	0,01	0,999

25 МэВ

L	Среднекв.	Пирсон
10	0,01	0,994
20	0,01	0,995
30	0,01	0,996
40	0,01	0,997
50	0,01	0,998
60	0,01	0,998
70	0,01	0,999
80	0,01	0,999
90	0,01	0,999
100	0,01	0,999
110	0,01	0,999
120	0,01	0,999
130	0,01	0,999

Анализ зависимости $E_\lambda(E_0)$



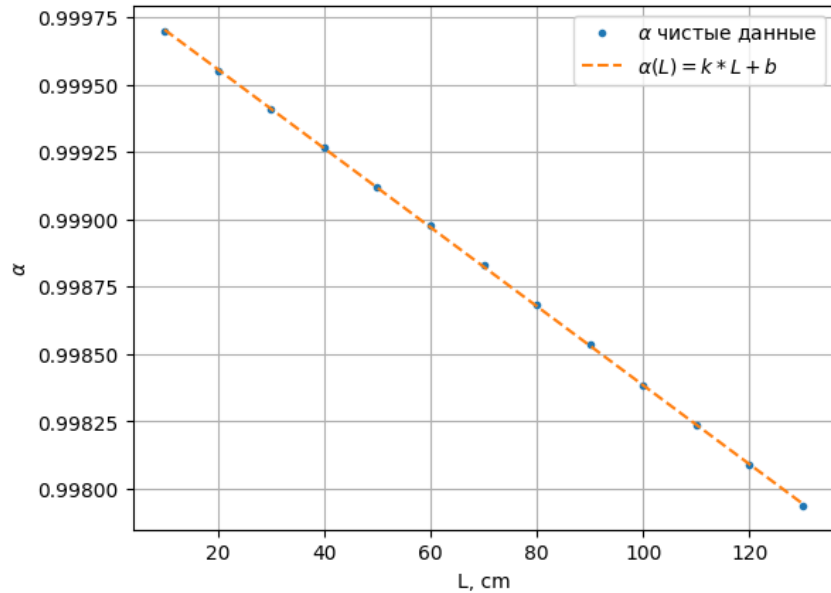
Аппроксимация $E_\lambda(E_0) = \alpha E_0 + \beta$

L	α	β
10	0,9997	-0,031
20	0,9996	-0,048
30	0,9994	-0,065
40	0,9993	-0,082
50	0,9991	-0,099
60	0,9990	-0,1168
70	0,9988	-0,1344
80	0,9987	-0,1520
90	0,9985	-0,1697
100	0,9984	-0,1875
110	0,9982	-0,2054
120	0,9981	-0,2234
130	0,9979	-0,2414

Анализ зависимостей $\alpha(L), \beta(L)$

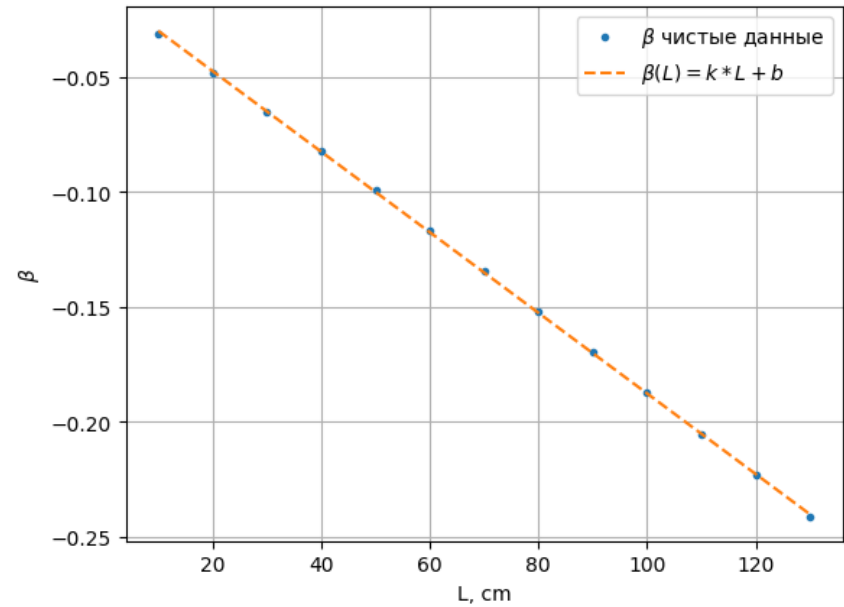
$$\alpha(L) = \alpha_1(L) + \alpha_2$$

$\alpha(L)$

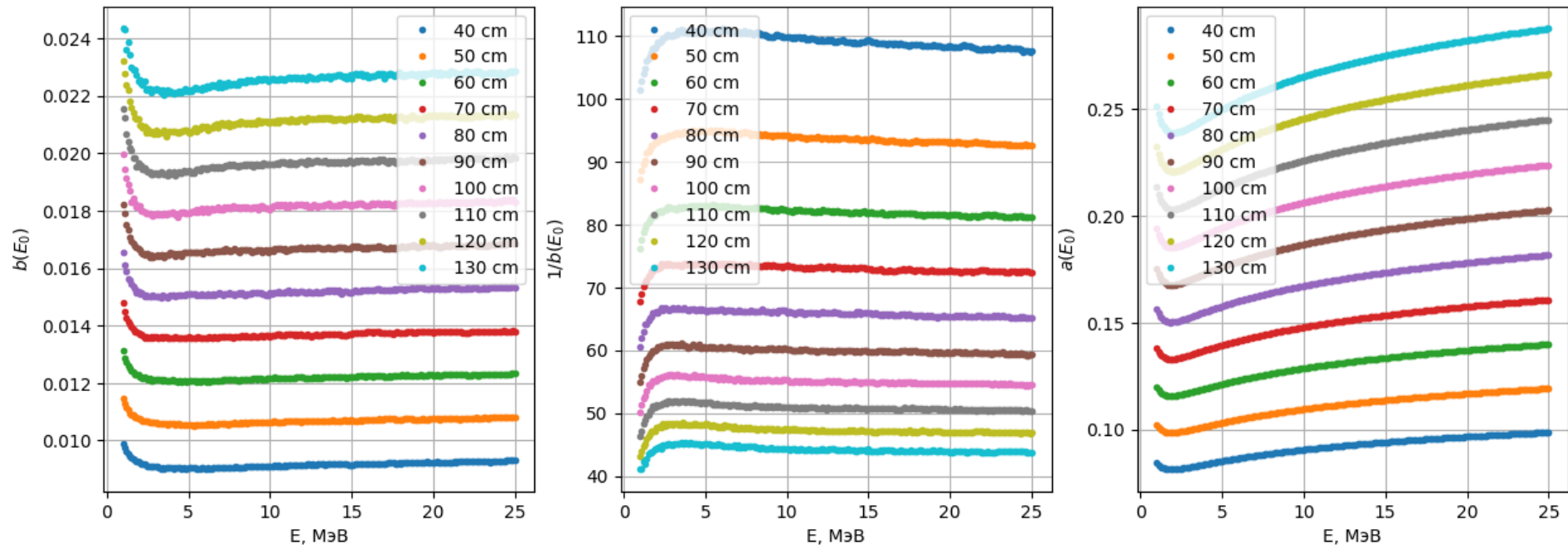


$$\beta(L) = \beta_1(L) + \beta_2$$

$\beta(L)$



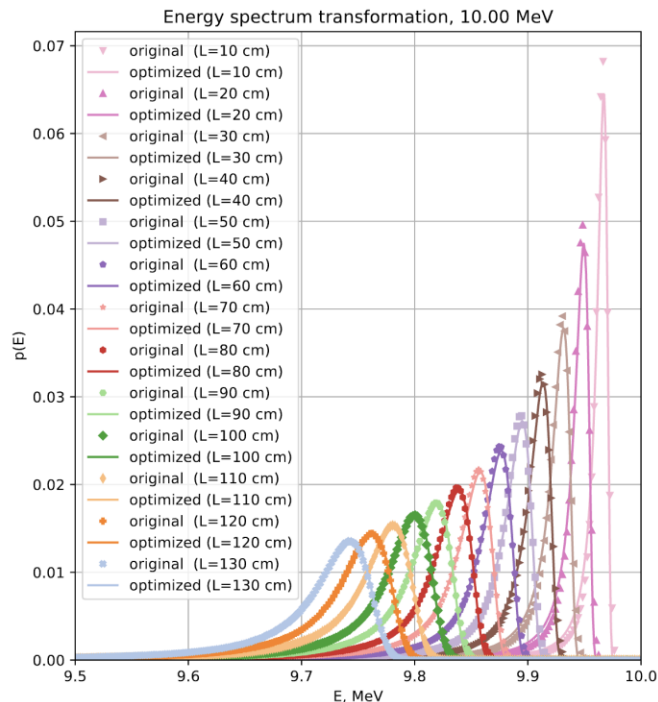
Анализ зависимостей параметра сдвига и масштаба от начальной энергии



Здесь $a(E_0) = E_0 - E_\lambda(E_0)$ – параметр сдвига.

Результаты

Связь энергетического спектра пучка электронов с расстоянием



Энергетические спектры электронов
с начальной энергией **10 МэВ**,
прошедших в воздухе путь до **130 см**

Полученные данные аппроксимировались
с помощью модифицированного
распределения Ландау:

$$\Lambda(E) = \lambda \left(\frac{E_0 - E - a}{b} \right)$$
$$\lambda(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \exp(-t \log(t) - xt) \sin(\pi t) dt$$

Здесь:

E_0 – начальная энергия электронов

a – параметр сдвига

b – параметр масштаба

$\lambda(x)$ – классическое распределение Ландау

Расчет энергетического пучка электронов, прошедших в воздухе путь L относительно источника

Интегральное представление:

$$\Phi(E, L) = \int_0^{E_{\max}} \Phi_0(\xi) \lambda\left(\frac{\xi - E - a(\xi, L)}{b(\xi, L)}\right) d\xi$$

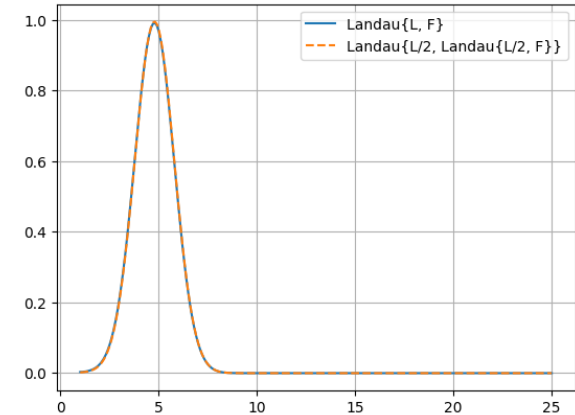
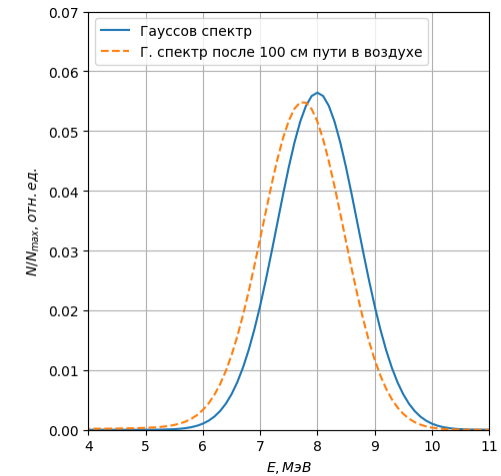
Матричное представление:

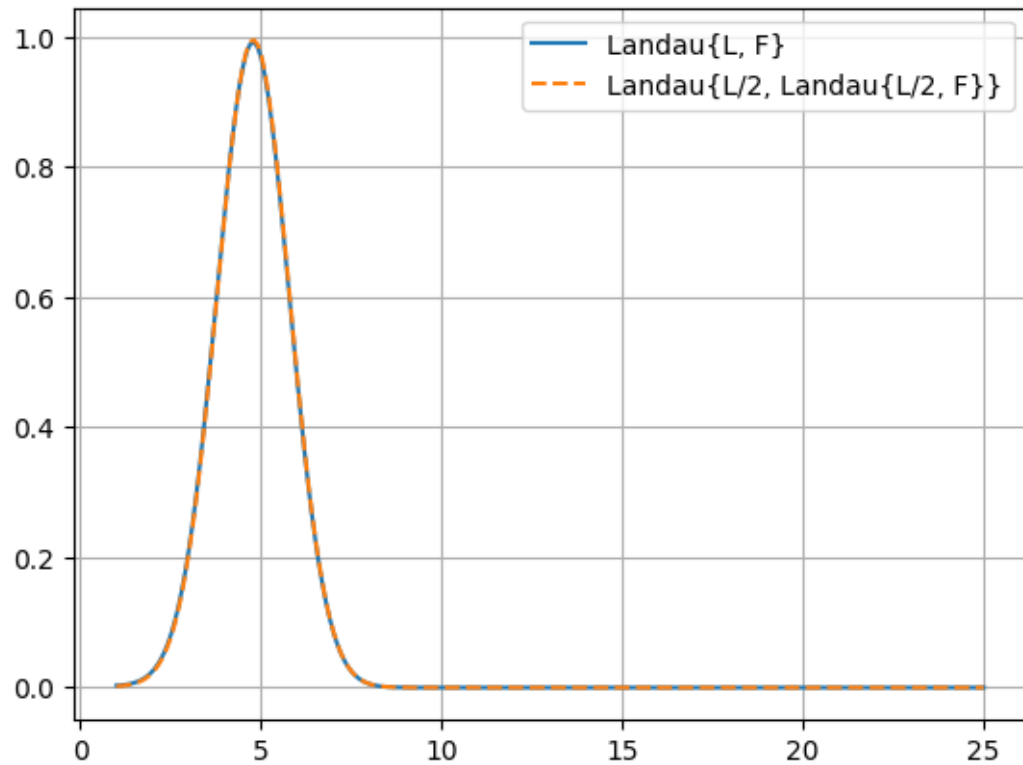
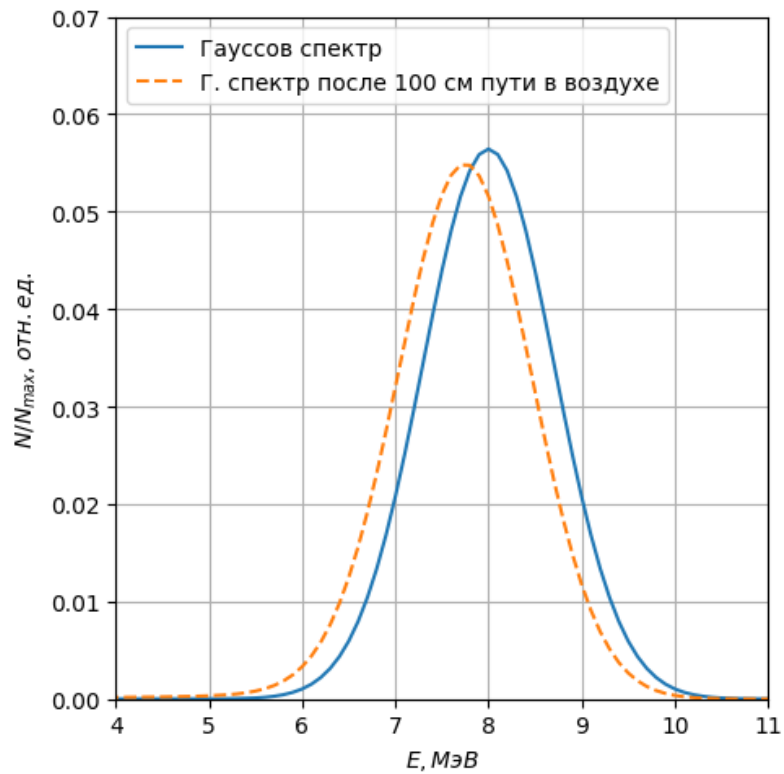
$$\Phi(E, L) = \Lambda(L)\Phi_0(E),$$

где $\Phi(E, L)$ - энергетический спектр электронов, прошедших в воздухе путь L, представленный в виде вектора $M \times 1$; $\Phi^i = \Phi(E_i)$.

$\Lambda(L)$ - матрица $M \times M$, составленная из элементов $\Lambda_{ij} = \lambda\left(\frac{\xi_i - E_j - a(\xi_i, L)}{b(\xi_i, L)}\right)$

$\Phi_0(E)$ - исходный энергетический спектр электронов представленный в виде вектора $M \times 1$; $\Phi_0^i = \Phi_0(E_i)$.





Решение обратной задачи

1) Заметим $\frac{1}{b(\xi)} = b_0 (1 - f(\xi))$ при этом $f(\xi)$ - малая функция

2) Разложим λ в ряд в окрестности $b_0(\xi - E)$, учитывая малость $a(\xi)$, $f(\xi)$:

$$\lambda\left(\frac{\xi - E - a(\xi)}{b(\xi)}\right) \approx \lambda(b_0(\xi - E)) - b_0 \lambda'(b_0(\xi - E)) \cdot [(\xi - E)f(\xi) + a(\xi)]$$

3) Используем полученное разложение:

$$\Phi(E) \approx \int \Phi_0(\xi) \lambda(b_0(\xi - E)) d\xi - b_0 \int_0^\infty \Phi_0(\xi) \lambda'(b_0(\xi - E)) \cdot [(\xi - E)f(\xi) + a(\xi)] d\xi$$

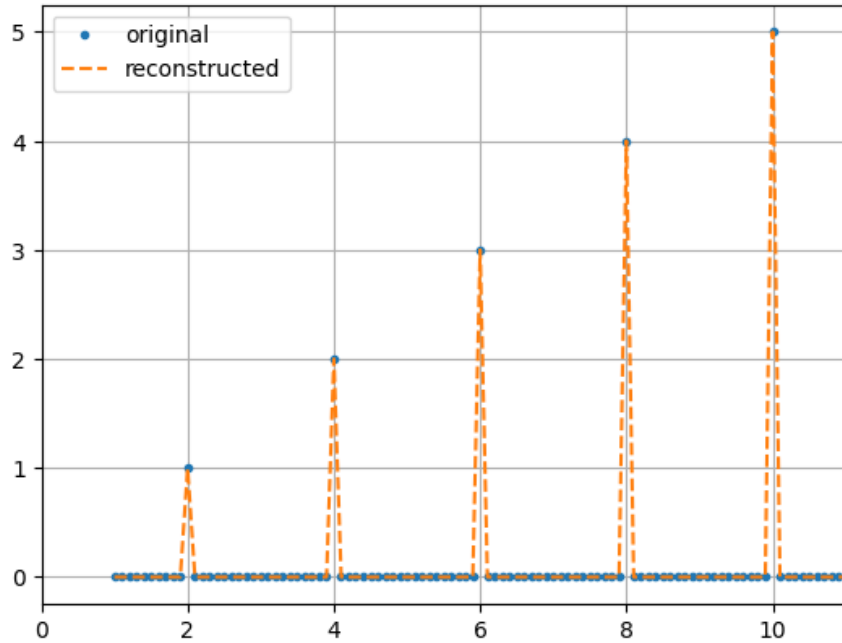
4) Представим $\begin{cases} \Phi_0 = \Phi_0^{(0)} + \delta\Phi_0; \Phi_0^{(0)} - \text{основной член, } \delta\Phi_0 - \text{малое возмущение} \\ \Phi = \Phi^{(0)} + \delta\Phi; \Phi^{(0)} - \text{основной член, } \delta\Phi - \text{малое возмущение} \end{cases}$

5) Строим решение по теории возмущений:

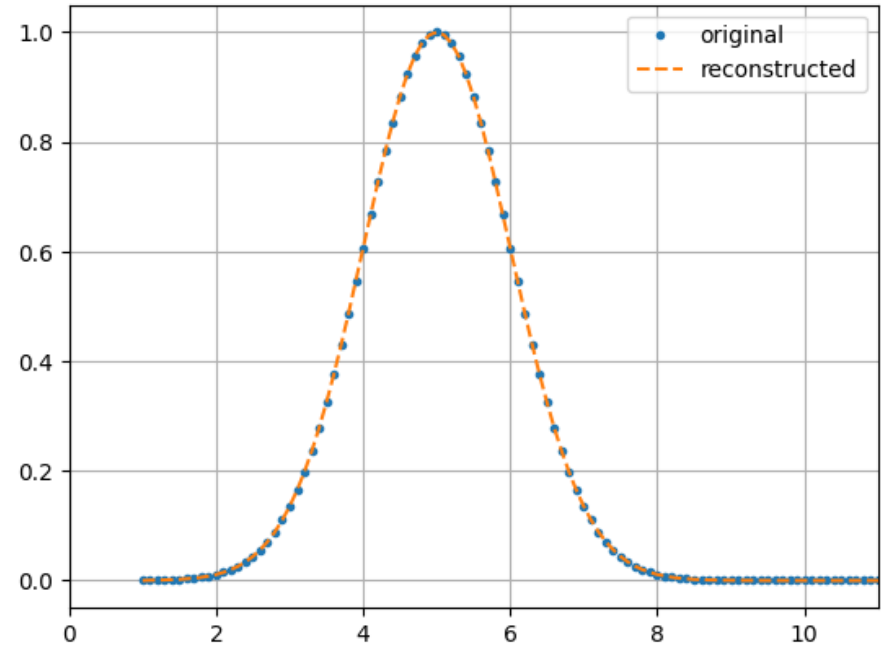
$$\Phi_0(E) \approx \mathcal{F}^{-1} \left[\frac{\mathcal{F}[\Phi](\omega)}{\mathcal{F}[\lambda(b_0 x)](\omega)} \right] (E) - \mathcal{F}^{-1} \left[\frac{\mathcal{F} \left[b_0 \int_0^\infty \Phi_0^{(0)}(\xi) \lambda'(b_0(\xi - E)) \cdot [(\xi - E)f(\xi) + a(\xi)] d\xi \right] (\omega)}{\mathcal{F}[\lambda(b_0 x)](\omega)} \right] (E)$$



Результаты решения обратной задачи восстановления спектра

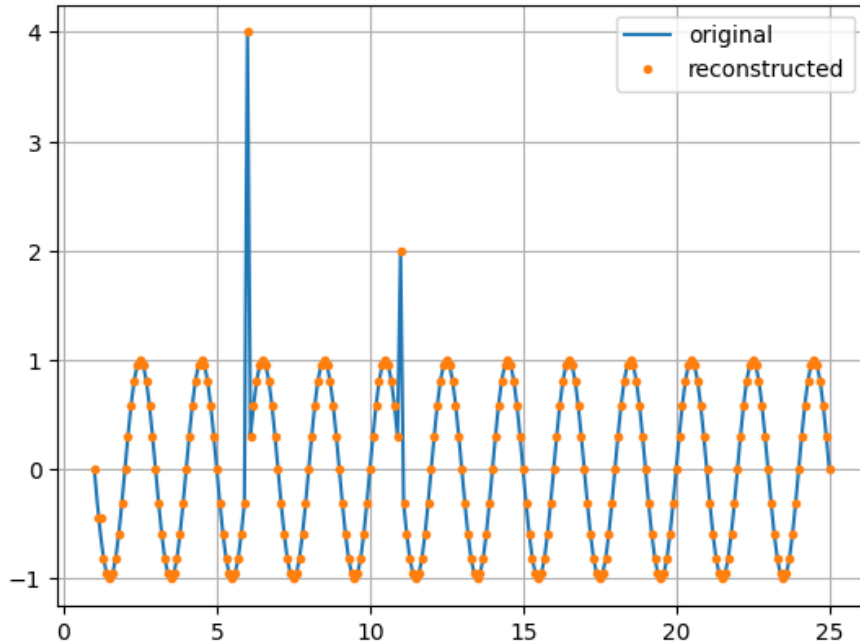


Результат восстановления дискретного энергетического спектра

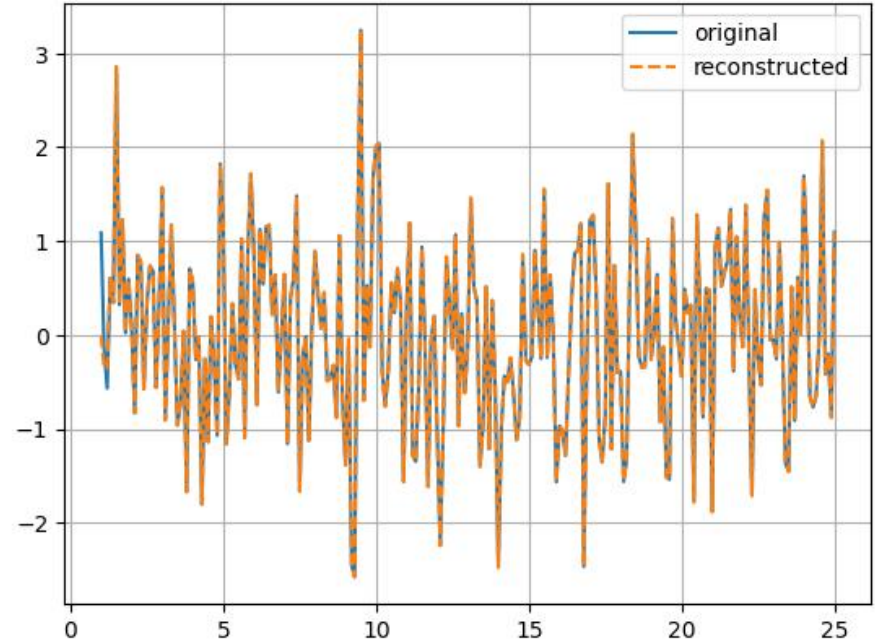


Результат восстановления гауссова энергетического спектра

Результаты решения обратной задачи восстановления спектра

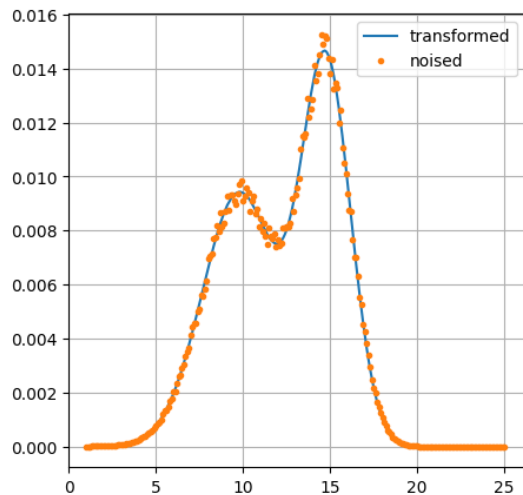


Результат восстановления синусоидально энергетического спектра с выбросами

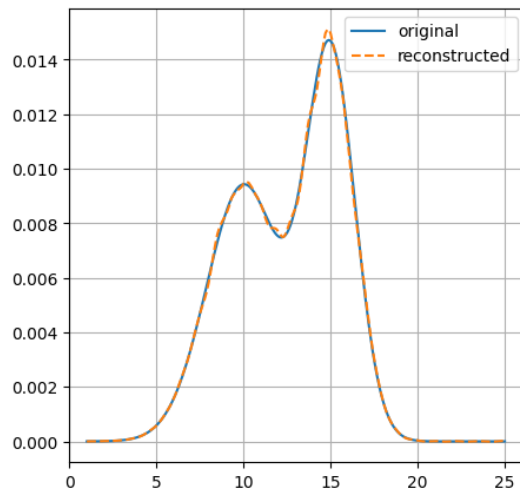


Результат восстановления энергетического спектра в виде гуссова шума

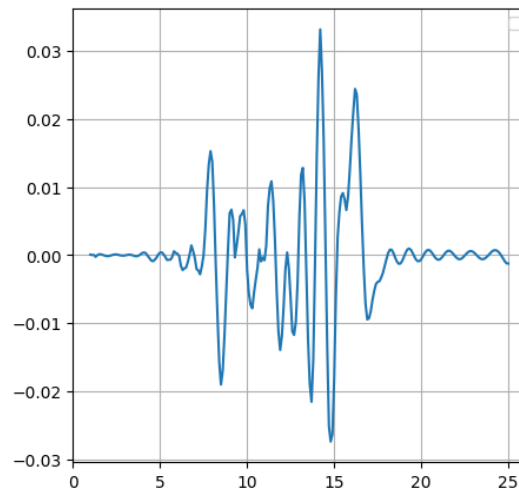
Результаты решения обратной задачи с зашумленными данными



а



б



в

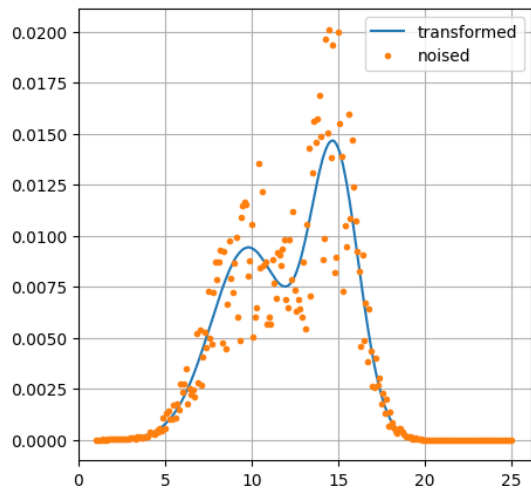
Результат восстановления энергетического спектра с 5%-шумом во входных данных

(а) зашумленный (оранжевые точки) и незашумленный (синяя кривая) спектры

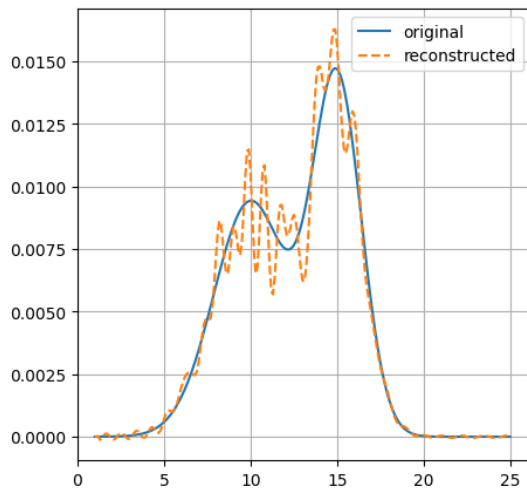
(б) оригинальный (синяя кривая) и восстановленный (оранжевая прерывистая) спектры

(в) отклонение восстановленного спектра от оригинального

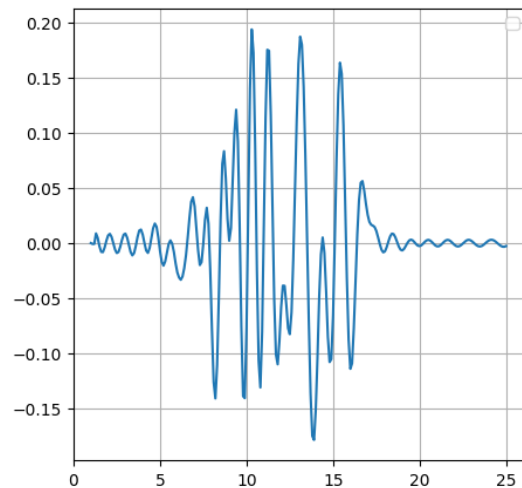
Результаты решения обратной задачи с зашумленными данными



а



б



в

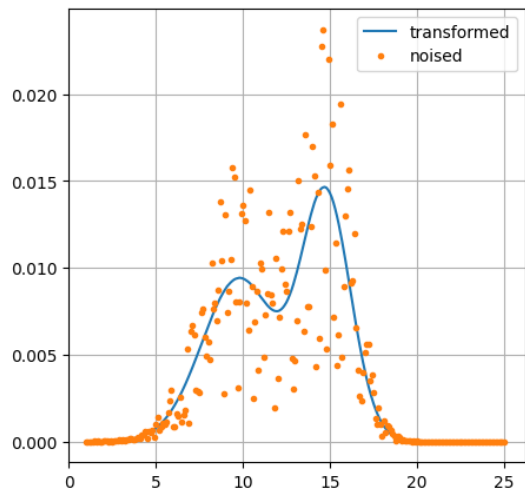
Результат восстановления энергетического спектра с 50%-шумом во входных данных

(а) зашумленный (оранжевые точки) и незашумленный (синяя кривая) спектры

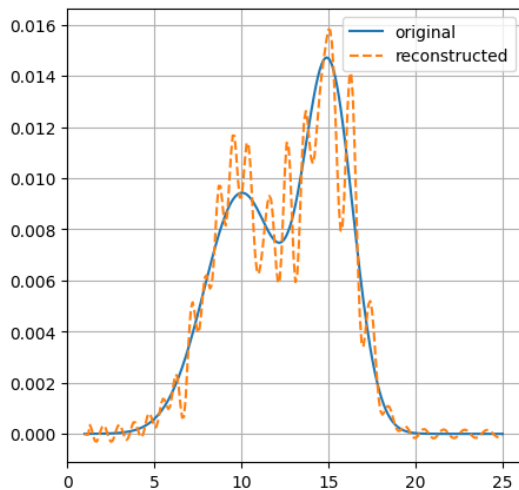
(б) оригинальный (синяя кривая) и восстановленный (оранжевая прерывистая) спектры

(в) отклонение восстановленного спектра от оригинального

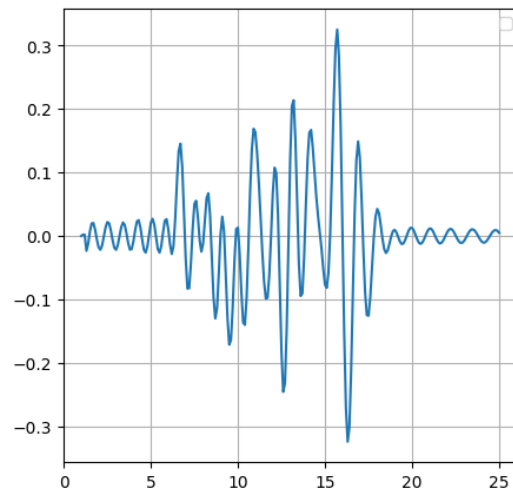
Результаты решения обратной задачи с зашумленными данными



а



б



в

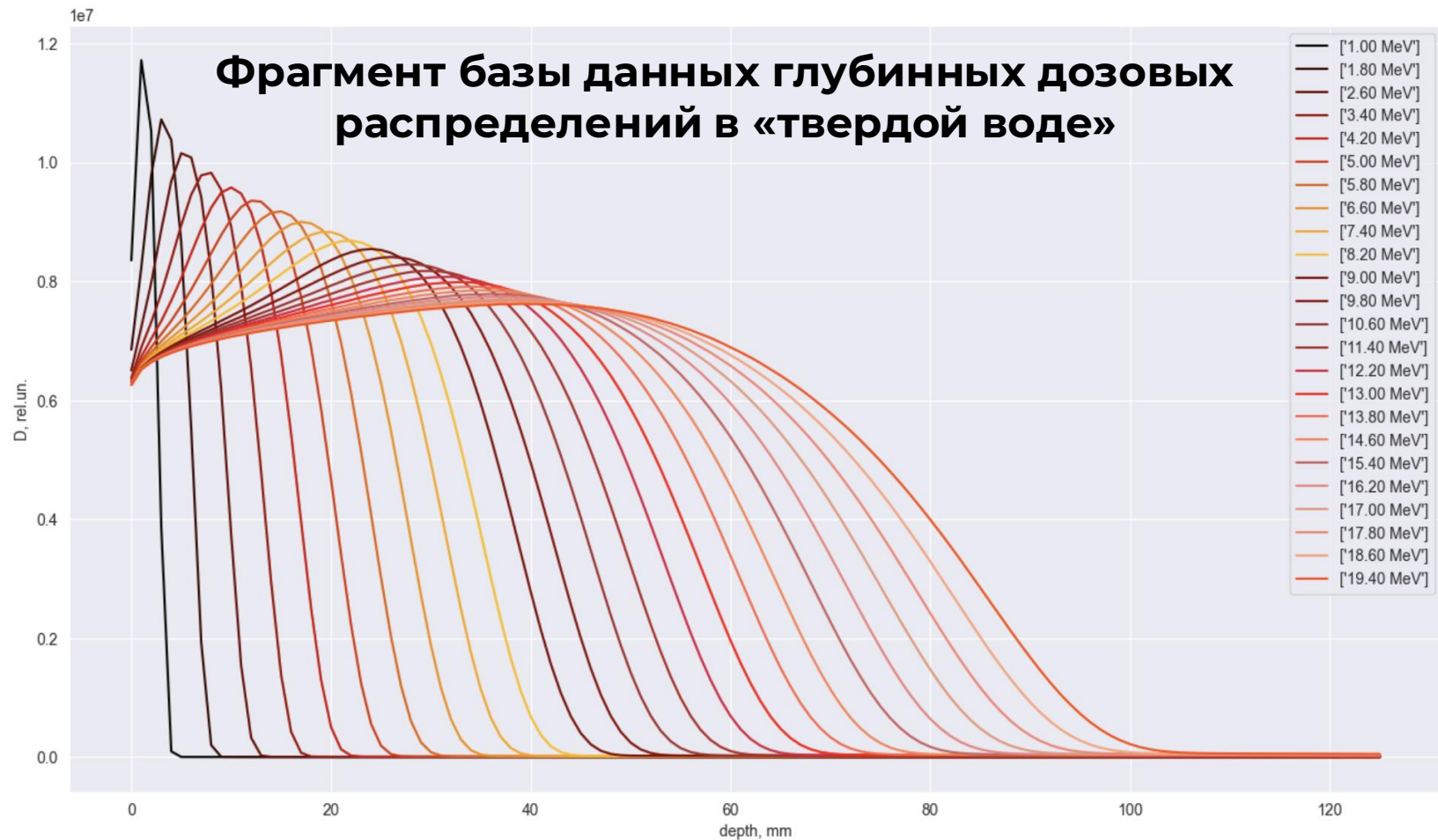
Результат восстановления энергетического спектра с 75%-шумом во входных данных

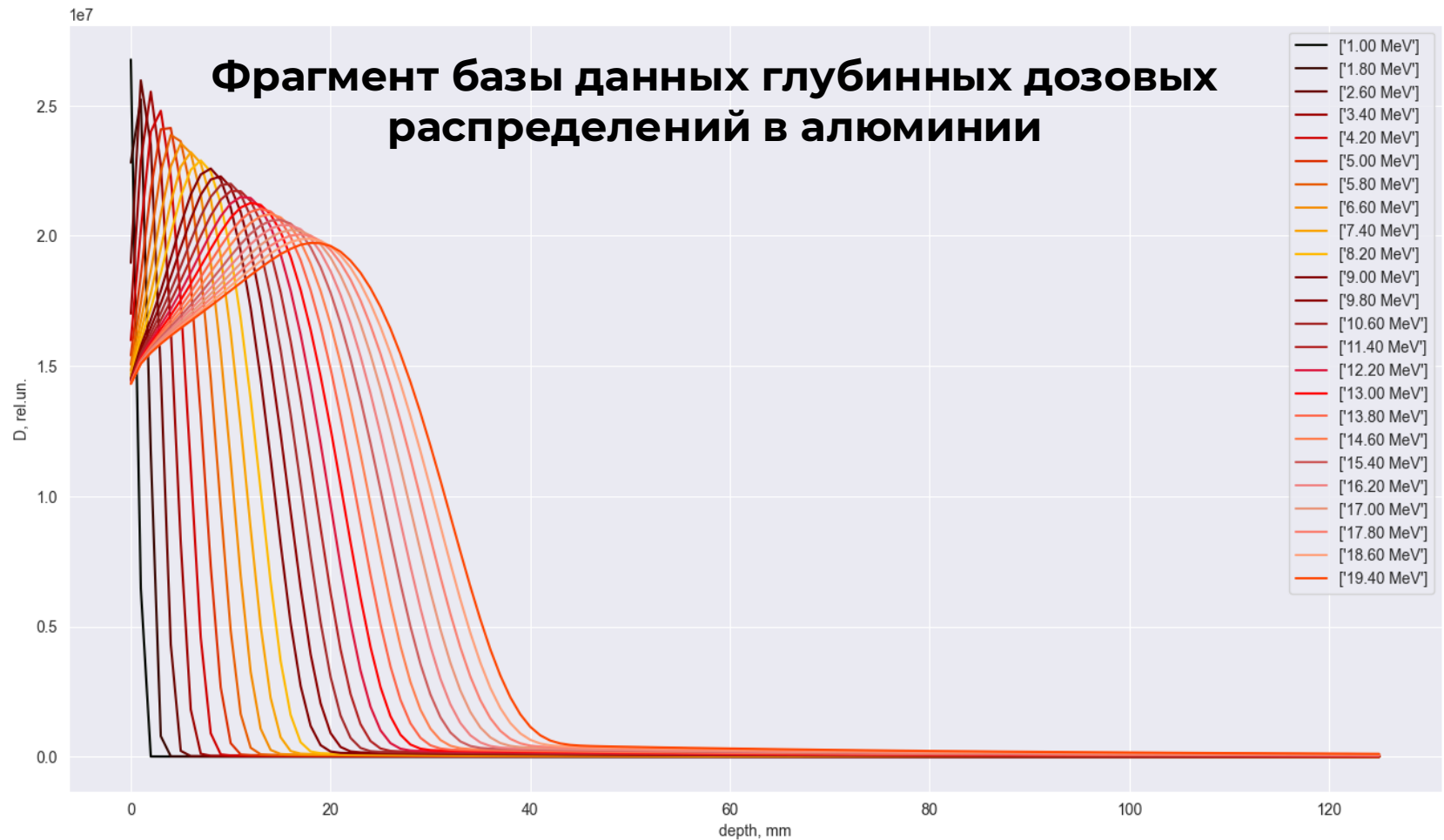
(а) зашумленный (оранжевые точки) и незашумленный (синяя кривая) спектры

(б) оригинальный (синяя кривая) и восстановленный (оранжевая прерывистая) спектры

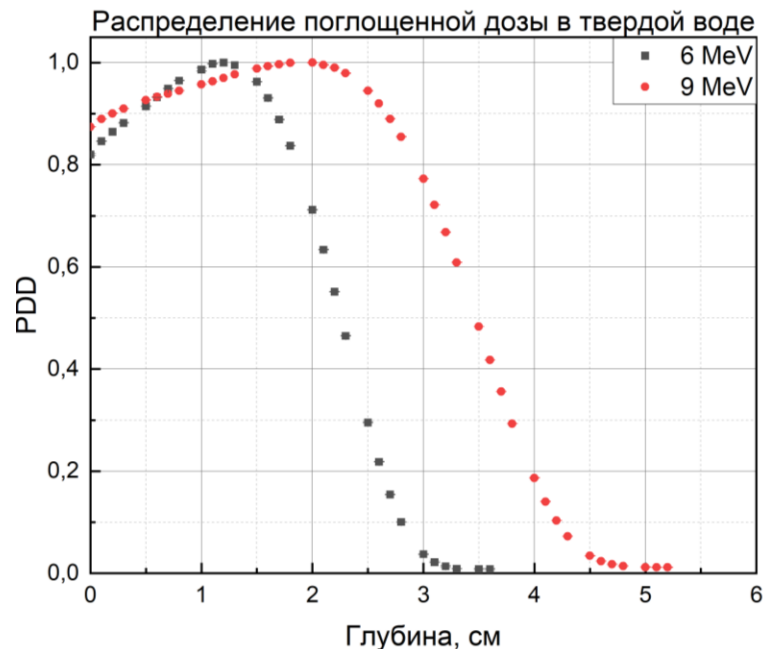
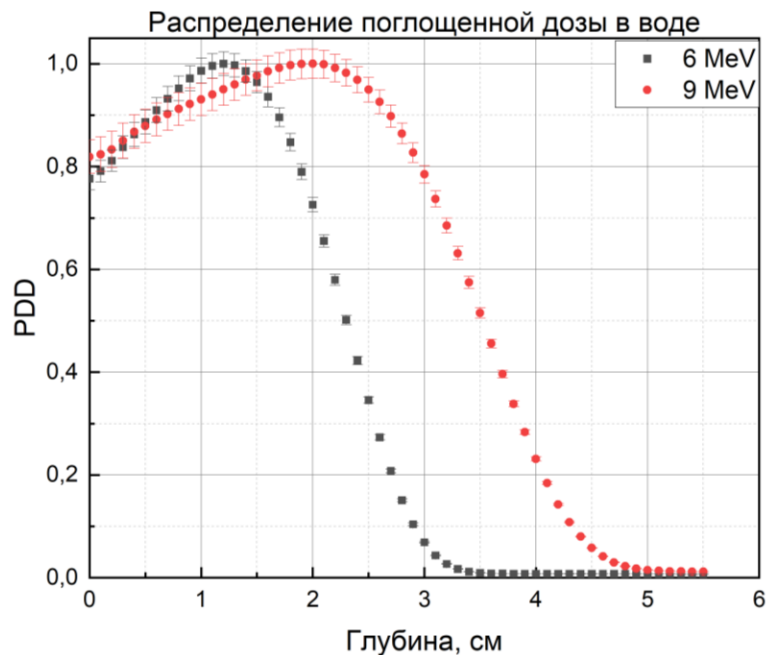
(в) отклонение восстановленного спектра от оригинального

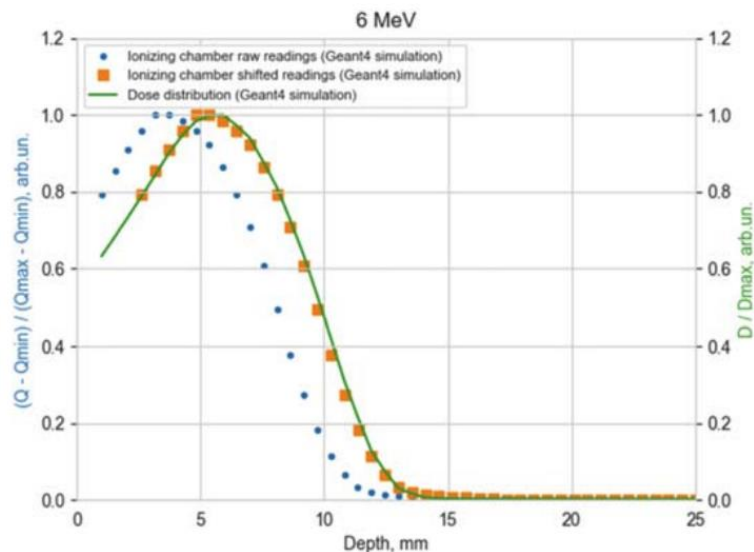
Приложения ко главе 2



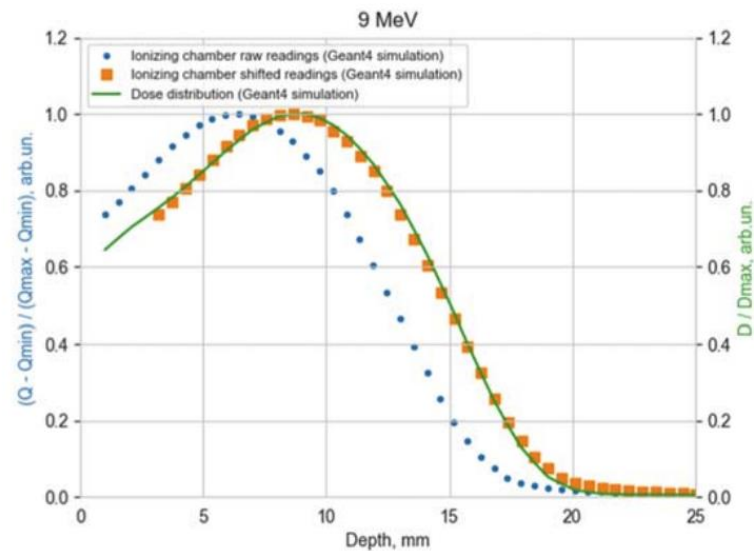


Experimental data





a



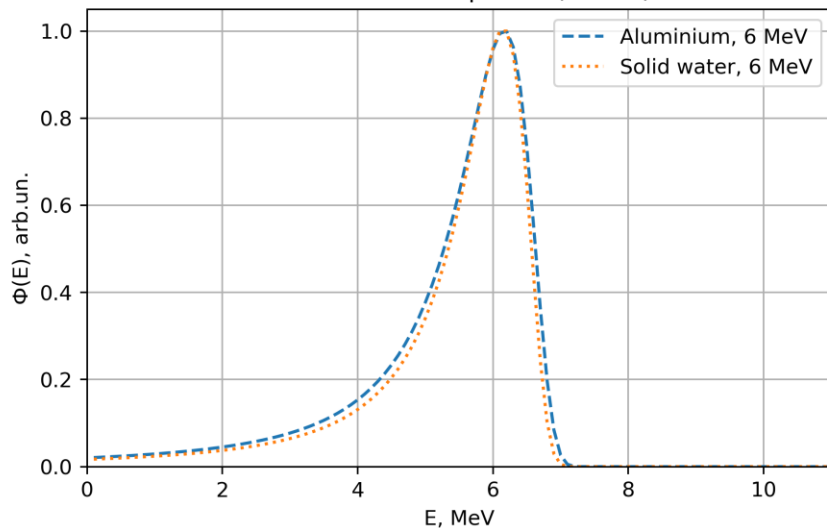
b

Figure 4. The simulation results of ionization chamber readings and the depth-dose distributions in the aluminium phantom irradiated with electrons having initial energies 6 MeV and 9 MeV. Blue dots indicate simulated ionization chamber readings in the simulation involving the aluminum plates of variable thickness placed over the ionization chamber when it was irradiated with electrons of initial energy (a) 6 MeV and (b) 9 MeV. The green curves represent the corresponding simulated depth-dose distributions. Orange squares are the simulated ionization chamber readings shifted in depth by $X_{\text{ref}} = 1.6$ mm in the 6 MeV case and $X_{\text{ref}} = 2.2$ mm in the 9 MeV case.

Результаты

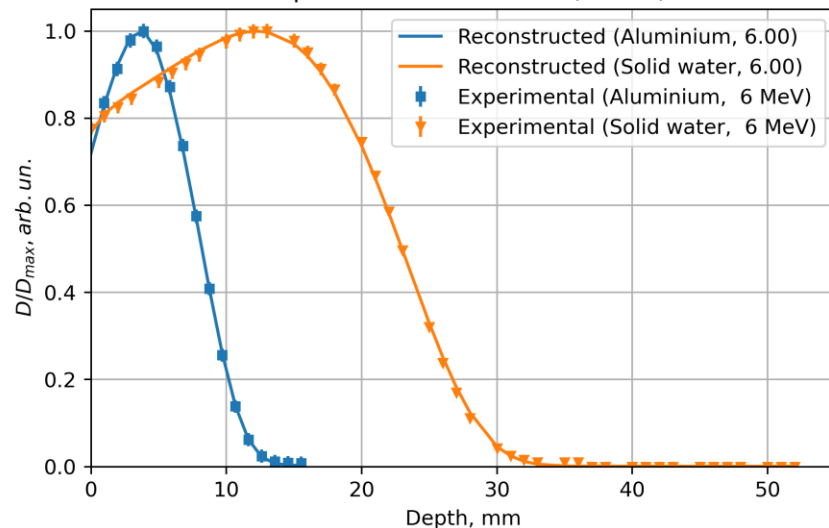
Реальный эксперимент

Reconstructed Spectra (9 MeV)



Энергетические спектры электронов, восстановленные по глубинным дозовым распределениям, измеренным в «твердой воде» и алюминии для ускорителя Varian TrueBeam, работающего в режиме 6 МэВ

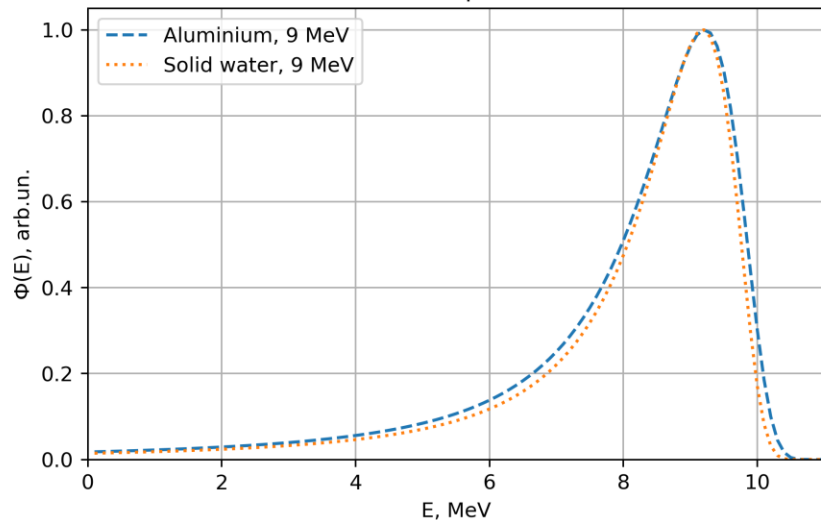
Depth-dose distributions (9 MeV)



Экспериментально измеренные и аналитически рассчитанные глубинные дозовые распределения в «твердой воде» и алюминии для ускорителя Varian TrueBeam, работающего в режиме 6 МэВ

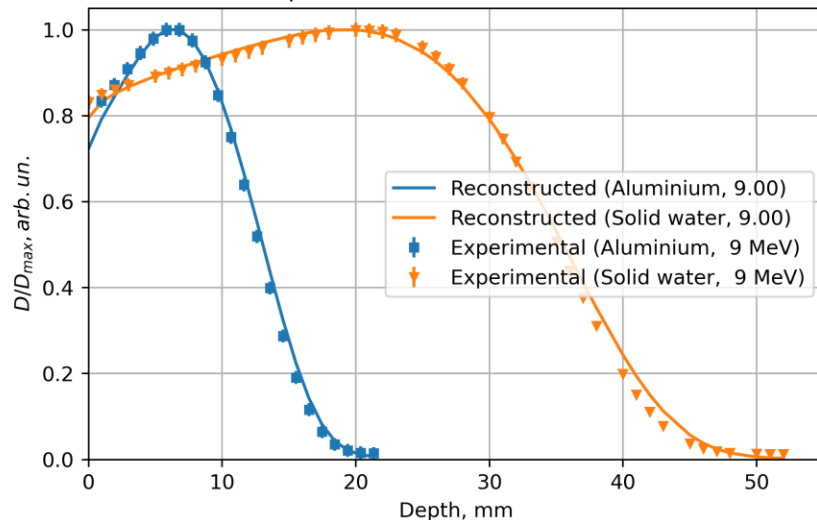
Результаты Реальный эксперимент

Reconstructed Spectra (9 MeV)



Энергетические спектры электронов, восстановленные по глубинным дозовым распределениям, измеренным в «твердой воде» и алюминии для ускорителя Varian TrueBeam, работающего в режиме 9 МэВ

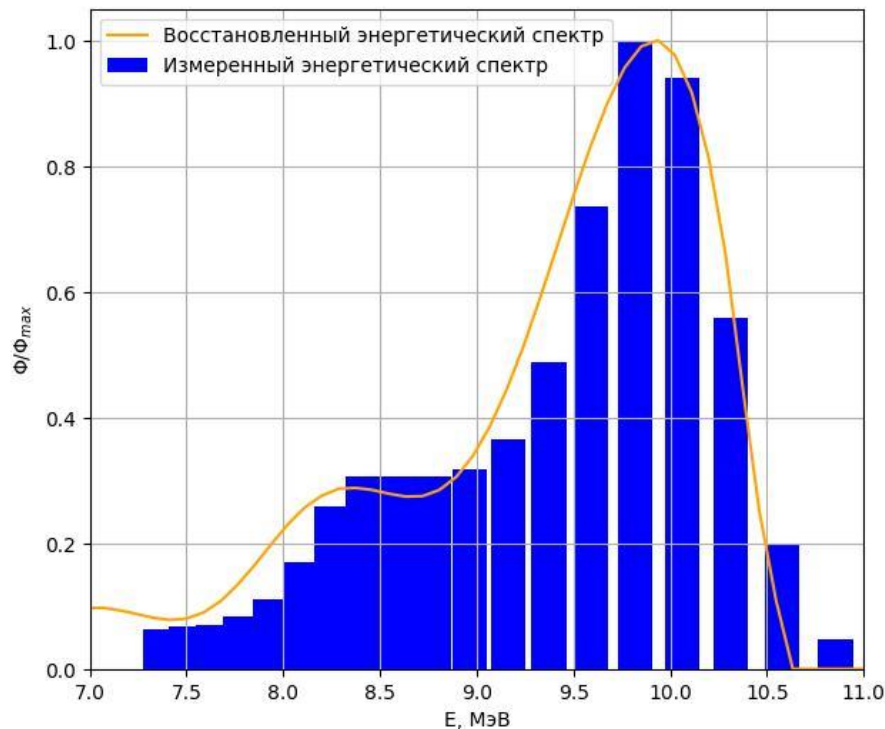
Depth-dose distributions (9 MeV)



Экспериментально измеренные и аналитически рассчитанные глубинные дозовые распределения в «твердой воде» и алюминии для ускорителя Varian TrueBeam, работающего в режиме 9 МэВ

Результаты

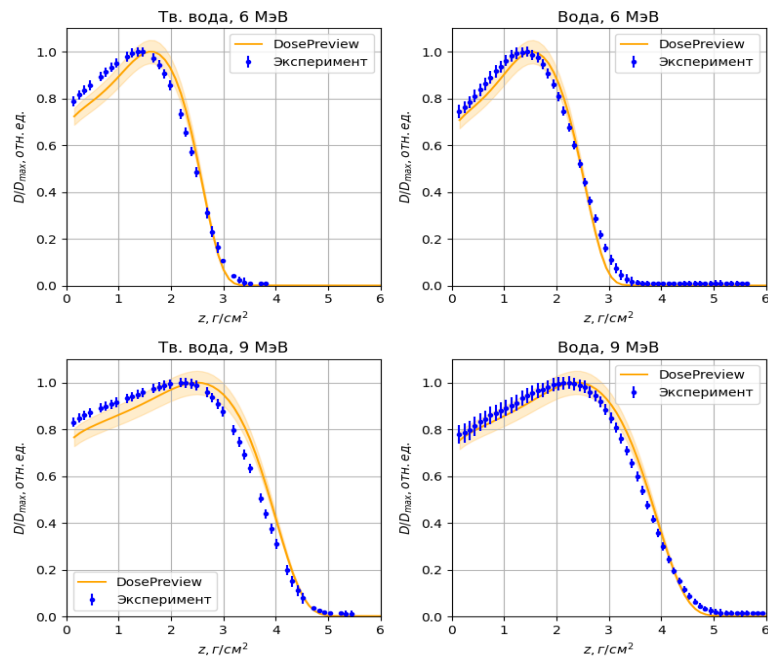
Восстановление энергетического спектра пучка ускорителя электронов УЭЛР-10-15-С по экспериментально измеренным глубинным дозовым распределениям



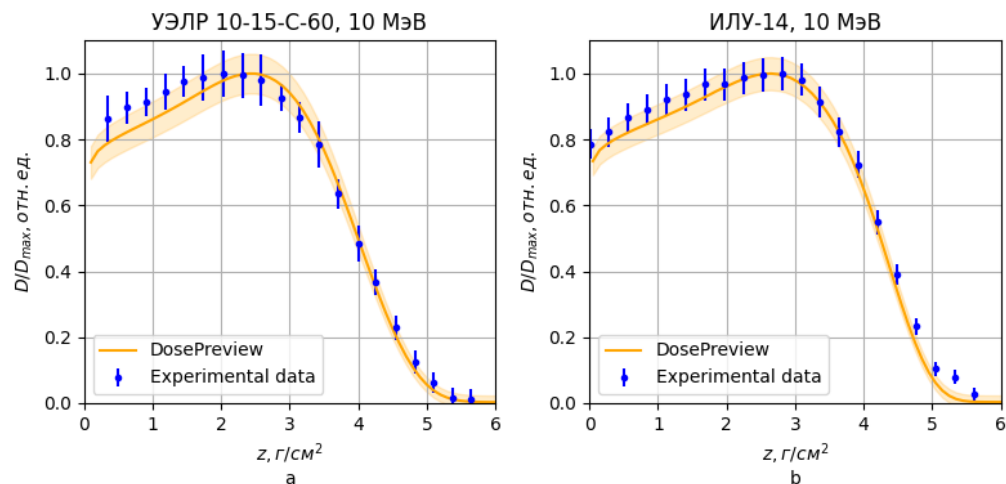
Энергетический спектр пучка ускорителя электронов УЭЛР-10-15-С, измеренный экспериментально (синие столбцы) и восстановленный по экспериментально измеренным глубинным дозовым распределениям в PETG-пластике (оранжевая кривая).

Приложения ко главе 3

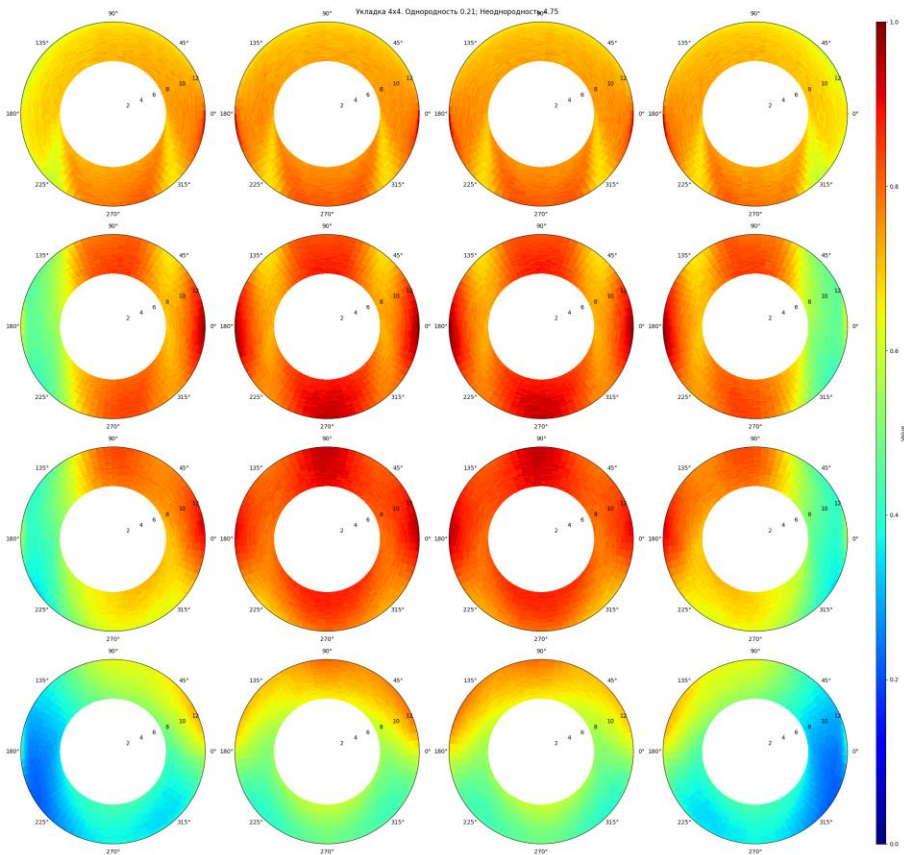
Экспериментальная проверка программная для быстрого расчета глубинных дозовых распределений по заданному спектру (DosePreview)



Экспериментально измеренные на медицинском ускорителе электронов глубинные дозовые распределения (синие точки) и результат расчетов DosePreview (оранжевые непрерывные)



Экспериментально измеренные на промышленных ускорителях электронов глубинные дозовые распределения (синие точки) и результат расчетов DosePreview (оранжевые непрерывные)



Распределение поглощенной дозы (расчет инструментарий Geant4) по объему термоусаживаемых изделий в укладке 4x4.

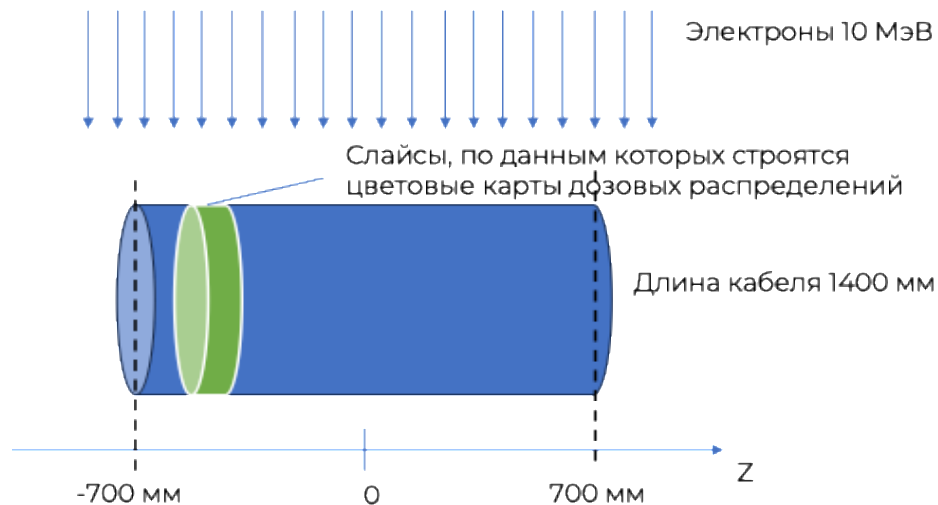
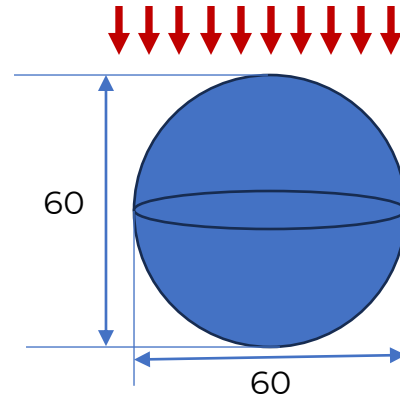
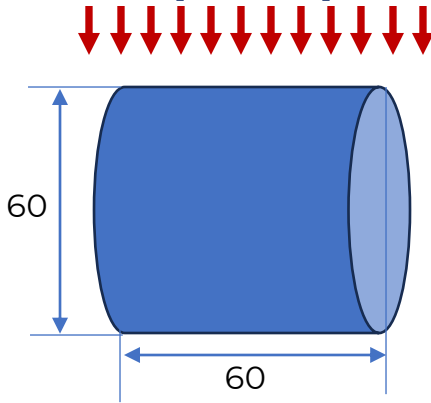
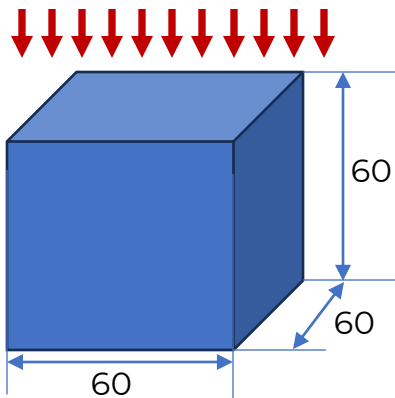


Схема моделирования для расчета распределения поглощенной дозы по объему термоусаживаемых изделий.



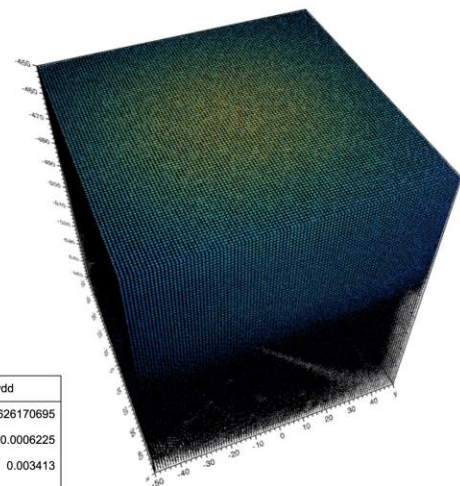
Компьютерное моделирование для расчета j, j объемных дозовых распределений



Параметры моделирования

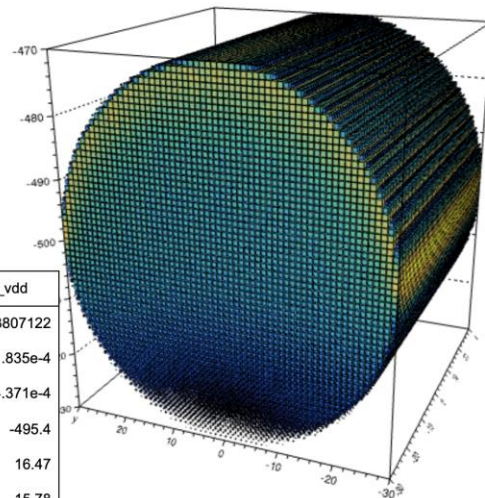
PhysicsList	QBBC-Livermore	Характерный размер ячейки	1 мм
Cut	0.1 мм	Статистика	$1e7$ частиц в каждом моделировании
Характерный размер фантома	60 мм	Энергия электронов, МэВ	0.1 МэВ -> 20 МэВ; $dE = 0.1$ МэВ

Объемные распределения поглощенной энергии в декартовой системе координат



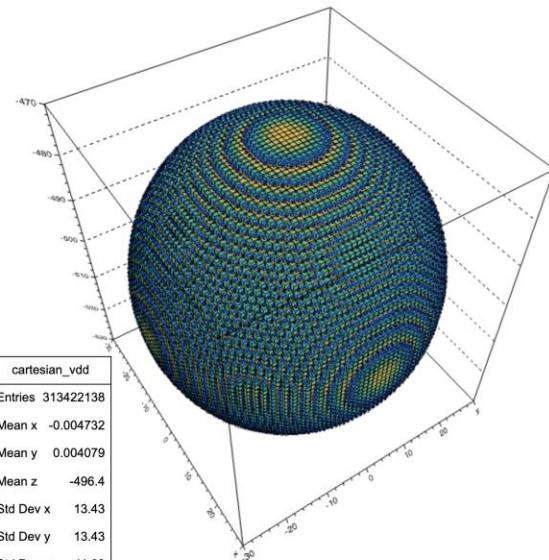
vdd
Entries 626170695
Mean x 0.0006225
Mean y 0.003413
Mean z -471.5
Std Dev x 26.15
Std Dev y 26.16
Std Dev z 12.79

Распределение
поглощенной энергии
по объему кубического
водного фантома



cartesian_vdd
Entries 1063807122
Mean x $-1.835e-4$
Mean y $4.371e-4$
Mean z -495.4
Std Dev x 16.47
Std Dev y 15.78
Std Dev z 12.36

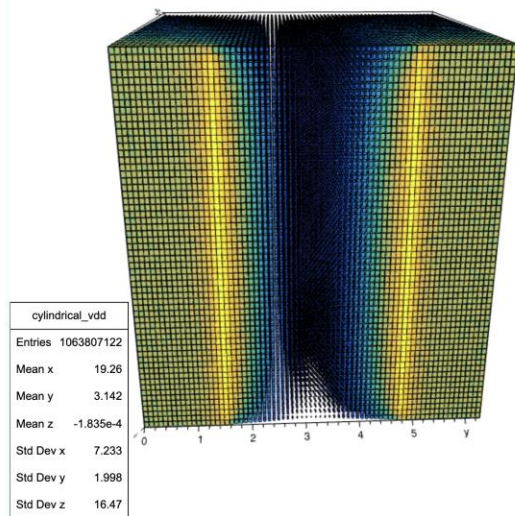
Распределение
поглощенной энергии
по объему цилиндрического
водного фантома



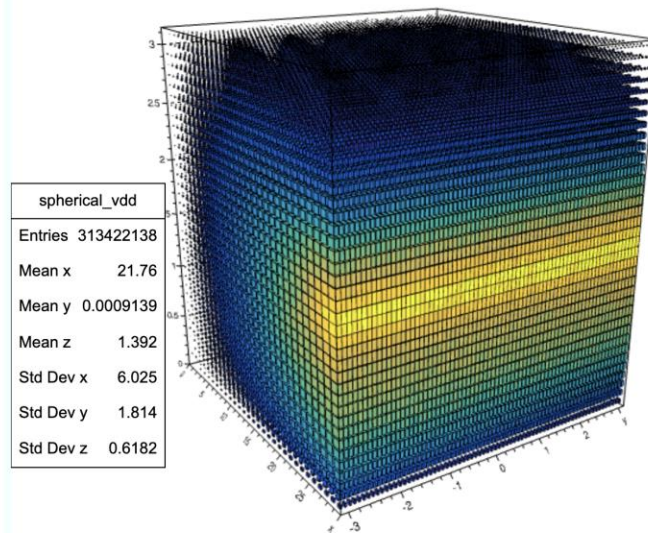
cartesian_vdd
Entries 313422138
Mean x -0.004732
Mean y 0.004079
Mean z -496.4
Std Dev x 13.43
Std Dev y 13.43
Std Dev z 11.69

Распределение
поглощенной энергии
по объему сферического
водного фантома

Объемные распределения поглощенной энергии в цилиндрической и сферической системах координат



Распределение
поглощенной энергии
в цилиндре
(цилиндрическая СК)



Распределение
поглощенной энергии
в сфере
(сферическая СК)

=

Demetra by IRT

? button ?

? button ?

? button ?

Length (cm) Width (cm) Mass (kg) Dose (Gy)

Calculate irradiation scheme

Dose in (Gy) Dose mid (Gy) Dose out (Gy)

Calibrate irradiation scheme

Irradiation sides Sweep (cm) Beam energy (MeV) Beam current (mA) Pulse duration (μ s) Pulse frequency (Hz) Sweep frequency (Hz) Conveyor speed (cm/s) Dose uniformity (arb. un.)

0 mm	...	...
9 mm	...	...
Expected uniformity		0.95

Improve uniformity
(linear combination)

DosePreview

Lorem ipsum

dolor sit amet

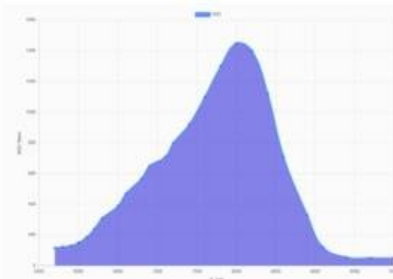
consectetur adipiscing elit

sed do eiusmod tempor

incididunt ut labore et dolore

magna aliqua

Accelerator energy spectrum



Depth-dose distribution

